

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE – UERN
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS – FANAT
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA – DI

José Figueiredo de Souza Neto

**Aplicação do Otimizador MPA na Operação de uma Rede de Escoamento
de Petróleo em Tempo Real**

MOSSORÓ - RN

2016

José Figueiredo de Souza Neto

**Aplicação do Otimizador MPA na Operação de uma Rede de Escoamento
de Petróleo em Tempo Real**

Monografia apresentada à Universidade do Estado do Rio Grande do Norte como um dos pré-requisitos para obtenção do grau de bacharel em Ciência da Computação, sob orientação da Prof^o. Dr. André Pedro Fernandes Neto.

MOSSORÓ - RN

2016

José Figueiredo de Souza Neto

**Catálogo da Publicação na Fonte.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

Souza Neto, José Figueiredo de
Aplicação do Otimizador MPA na Operação de uma Rede de
Escoamento de Petróleo em Tempo Real. / José Figueiredo
de Souza Neto. - Mossoró, RN, 2016.

73 p.

Orientador(a): Profº. Dr. André Pedro Fernandes Neto

Dissertação (Bacharel em Ciência da Computação). Universidade
do Estado do Rio Grande do Norte.

1. Módulo de Procedimentos Automatizados (MPA).
2. Otimizador em um Sistema Especialista - Rede de Escoamento
de Petróleo. 3. Oleodutos – Automação. I. Fernandes Neto, André

Bibliotecária: Jocelania Marinho Maia de Oliveira CRB 15 / 319

José Figueiredo de Souza Neto

**Aplicação do Otimizador MPA na Operação de uma Rede de Escoamento
de Petróleo em Tempo Real**


Monografia apresentada como pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN, submetida à aprovação da banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Aprovado em 31 / 05 / 2016

Banca Examinadora



Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto (Orientador)
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN



Prof. Dr. Francisco Chagas de Lima Júnior
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN



Prof. Dr. Carlos Heitor Pereira Liberalino
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN

*Aos meus pais, José Humberto e Ádina
por todos os anos dedicados a minha
educação.*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha esposa Glícia e à meus filhos Vinicius e Alice, pelo amor incondicional, pela compreensão e paciência nos momentos dedicados a este trabalho.

Ao meu orientador, Dr. André Pedro, pela confiança e compreensão.

Ao CENPES-PETROBRAS, pelo financiamento do projeto.

Ao Dr. Mário Campos (CENPES – PETROBRAS), pelas sugestões, apoio e por ter acreditado nesta ideia.

Ao Dr. Marcelo Lopes de Lima (CENPES – PETROBRAS) pela implementação do modelo matemático.

Ao engenheiro Raphael Enes (Tecgraf) pela implementação do sistema em MPA.

Ao amigo Antônio Cabral Filho (PETROBRAS) pelo apoio e suporte na automação.

Aos colegas da Petrobras, em especial Daniel, Peralta, Ernande, Murilo e Leopoldo pelo incentivo e cobranças para que eu terminasse este TCC.

E a todos que de alguma maneira se fizeram presentes, se preocuparam, foram solidários e torceram por mim.

A primeira regra de qualquer tecnologia utilizada nos negócios é que a automação aplicada a uma operação eficiente aumentará a eficiência. A segunda é que a automação aplicada a uma operação ineficiente aumentará a ineficiência.

Bill Gates

RESUMO

Este trabalho aborda o problema de transporte de petróleo através de bombas que escoam o fluido por oleodutos até uma estação central onde a água é separada do óleo. A operação descentralizadas destas bombas provoca instabilidades que prejudicam o processo de tratamento. O objetivo do presente trabalho é aplicar um Otimizador em um Sistema Especialista para operação de uma Rede de Escoamento de Petróleo em tempo real, garantindo uma taxa de fluxo constante no ponto de entrega. Este trabalho descreve um sistema desenvolvido para otimizar a operação de escalonamento de bombas. A metodologia utilizada consiste na modelagem matemática do problema utilizando técnicas de otimização com Programação Quadrática Inteira Mista para a solução. Para aplicação do otimizador é utilizado o Módulo de Procedimentos Automatizados (MPA), que permite que as soluções obtidas transformem-se em ações em tempo real num sistema automatizado. Os testes e implantação do sistema tiveram bons resultados, garantindo a minimização da vazão, comprovando a eficiência do otimizador. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios para o problema tratado, atingindo o objetivo principal de minimização da vazão de chegada na estação destino.

Palavras-chave: MPA. Otimização. Minimização. Oleodutos. Automação.

ABSTRACT

This paper addresses the problem of oil transportation through pumps that drain the fluid by pipelines to a central station where the water is separated from the oil. The decentralized operation of these pumps causes instabilities detrimental to the treatment process. The objective of this study is to apply a Optimizer in an Expert System for operation of an oil flow network in real time, ensuring a constant flow rate at the delivery point. This paper describes a system designed to optimize the scheduling of operating pumps. The methodology used is the mathematical problem of modeling using optimization techniques with Quadratic Programming Mixed Integer. For the purposes of the optimizer is used Automated Procedures Modulus (MPA), which allows transformed solutions obtained in real time in an automated system actions. Testing and system implementation had good results, ensuring the minimization of flow, proving the efficiency optimizer. The results were satisfactory for the problem treated, achieving the main objective of minimizing the arrival of flow at the destination station.

Keywords: MPA. Optimization. Minimization. Pipelines. Automation.

LISTA DE SIGLAS

- Δh_n^{k+1} - variação de nível da estação n no momento $k+1$
 $\Delta q_{o,n}^k$ - variações nas vazões de saída
 h_n^0 - nível inicial da estação n
 h_n^k - nível da estação n no momento k
 h_n^{k+1} - nível da estação n no momento $k+1$
 h_n^{max} - limites físicos dos tanques
 h_n^{min} - limites físicos dos tanques
 $h_n^{ref,k}$ - níveis de referência da estação n no momento k
 $h_n^{ref,max}$ - níveis de controle máximo
 $h_n^{ref,min}$ - níveis de controle mínimo
 Q_n - capacidade nominal de cada bomba da estação n
 nb_n - numero de bombas de uma mesma estação n
 $nb_n^{on,k}$ - número de bombas ligadas no instante k
 $q_{i,n}^k$ - vazão de entrada no instante k
 $q_{o,n}^k$ - vazão de saída no instante k
 $u_{n,i}^k$ - comando que aciona a i 'essima bomba da estação satélite n
 $u_n^{on,k}$ e $u_n^{off,k}$ - comandos de ligar ou desligam uma bomba no instante k
 Δq_o^{max} - variação máxima desejável no destino (somatório das estações)
CPLEX - é um pacote de software de otimização. C em referência à linguagem C, com a terminação PLEX, do algoritmo simplex
CS - Estação Central
GAMS - General Algebraic Modeling System
IHM - Interface Homem Máquina
IDE - Ambientes de Desenvolvimento Integrado
 k - tempo de amostragem
KP - ação Proporcional do controlador PID
MIQP - *Mixed Integer Quadratic Program*
MPA - Módulo de Procedimentos Automatizados
 n - cada estação satélite
OPC - *OLE for Process Control*
PID - Controlador Proporcional Integral e Derivativo
PLC - *Programmable Logic Controller*
PNLIM - Programação Não Linear Inteira Mista
PQIM - Programação Quadrática Inteira Mista
SAD - Sistemas de Apoio à Decisão
SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*
SS - estações satélites
 T - tempo entre índices k e $k+1$
TD - ação Derivativa do controlador PID
TI - ação Integral do controlador PID
 LSH_{AUX} - nível alto auxiliar de controle para o MPA desligar bomba
 LSH_{sint} - nível alto auxiliar de controle para o MPA modificar sintonia do PID
 LSL_{AUX} - nível baixo auxiliar de controle para o MPA desligar bomba
 LSL_{sint} - nível baixo auxiliar de controle para o MPA modificar sintonia do PID

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Rede de Escoamento de Petróleo.....	19
Figura 1.2: Estação satélite (SS).....	19
Figura 2.1: Processo de Modelagem.....	26
Figura 2.2: Estrutura geral do modelo GAMS.....	31
Figura 2.3 Controle PID de processo contínuo.....	37
Figura 2.4: Arquitetura de um Sistema Especialista para domínio particular	39
Figura 2.5 Processo de utilização do MPA.....	41
Figura 3.1 Faixas de controle de nível	49
Figura 3.2 Faixas de Sintonia.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 Simulação: Variação de níveis.....	53
Gráfico 4.2 Simulação: Variação de vazão	53
Gráfico 4.3 Variação de vazões das Estações do Teste Piloto	54
Gráfico 4.4 Variação de níveis das Estações do Teste Piloto	55
Gráfico 4.5 Período de instabilidade sem MPA	56
Gráfico 4.6 Período de estabilidade sem MPA.....	56
Gráfico 4.7 Período de ajustes do otimizador.....	57
Gráfico 4.8 Vazão de chegada após ajustes no otimizador	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistema de Produção Ilustrativo	52
Tabela 2: Condições Iniciais.....	52
Tabela 3: Parâmetros.....	52

LISTA DE EQUAÇÕES

(2.1) problema geral de programação linear	28
(2.2) restrição do problema geral de programação linear.....	28
(2.3) problema de Programação Quadrática	29
(3.1) nível do tanque no momento.....	43
(3.2) vazão de saída.....	43
(3.3) variação do nível das estações	44
(3.4) variação do nível das estações pela vazão de saída	44
(3.5) predição do nível.....	44
(3.6) variação de vazão de saída	44
(3.7) restrição para 3.6	44
(3.8) restrição para 3.6	44
(3.9) numero de bombas	45
(3.10) restrição para 3.9	45
(3.11) vazão total.....	45
(3.12) variação da vazão	45
(3.13) restrição para 3.12	45
(3.14) requisito para controle de nível	46
(3.15) restrição pra 3.14	46
(3.16) restrição pra 3.14	46
(3.17) função objetivo	46
(3.18) restrição para 3.17	46
(3.19) restrição para 3.17	47
(3.20) restrição para 3.17	47
(3.21) restrição para 3.17	47
(3.22) restrição para 3.17	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Contextualização.....	17
1.2	Objetivo geral	18
1.3	Objetivos específicos	18
1.4	Problemática do Escalonamento de Bombas.....	18
1.5	Metodologia.....	21
1.6	Organização do Trabalho.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	Trabalhos relacionados ao Problema.....	23
2.2	Otimização e Pesquisa Operacional	25
2.2.1.	General Algebraic Modeling System (GAMS).....	30
2.2.2.	CPLEX.....	31
2.2.3.	O Algoritmo <i>SIMPLEX</i>	32
2.2.4.	O Algoritmo <i>Branch-and-Bound</i>	34
2.3	Automação e controle de processos	35
2.4	Sistemas Especialistas.....	38
2.4.1.	Módulo de Procedimentos Automatizados (MPA)	40
3	MODELAGEM DO PROBLEMA DE ESCALONAMENTO DE BOMBAS...	43
3.1	Formulação do problema	43
3.2	Construção do Modelo Matemático.....	45
3.2.1.	Implementação em GAMS.....	47
3.3	Regras de inferência no MPA	48
3.3.1.	Fluxos para Executar otimizador GAMS.....	48
3.3.2.	Fluxo para Ajuste sintonia PID Bombas com Variador	50
3.3.3.	Fluxos de comando para Ligar/desligar bomba da EC	51
4	RESULTADOS	52
4.1	Teste do Modelo e avaliação da Solução obtida.....	52
4.2	Teste de Implantação parcial	53
4.3	Implantação do Sistema.....	55

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
	Referências	60
	APÊNDICES.....	64
	APÊNDICE1: Código do otimizador GAMS (arquivo: cam_escalamento_bombas.gms)	64
	APÊNDICE2 DIAGRAMA: Inicia Fluxos Gams	68
	APÊNDICE3 DIAGRAMA: Gams Atualizar Cond.....	69
	APÊNDICE4 DIAGRAMA: Gams Executa	70
	APÊNDICE5 DIAGRAMA: Ajuste sintonia PID Bombas com Variador	71
	APÊNDICE6 DIAGRAMA: Ligar bomba da EC.....	72
	APÊNDICE7 DIAGRAMA: Desligar bomba da EC.....	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Desde o fim do século XIX que a existência de Petróleo é um sinônimo de riqueza e poder para um país. Em boa parte desse período, o Brasil sempre alimentou a crença dos estudiosos e empresários nacionais de que houvesse grandes reservas, capazes de tornar o país autossuficiente desse recurso energético.

Em 1932 iniciaram estudos sobre a existência de petróleo no bairro de Lobato, em Salvador. Em 1953 com a criação da empresa estatal Petrobras, houve um impulso ao desenvolvimento da produção nacional. Em 2006, com o avanço da exploração em águas profundas o volume de produção atingiu patamares elevados a ponto de conseguir superar, pela primeira vez, o valor da demanda total da nossa economia.

No Rio Grande do Norte a produção de petróleo teve início em 1980, e passou a ser o maior produtor terrestre de petróleo no Brasil. Existem cerca de 15 municípios produtores neste estado, havendo mais de 4.000 poços perfurados e mais de 500 quilômetros de oleodutos, que são utilizados para o transporte da produção.

O sistema de produção de petróleo inicia-se com a sua extração através dos poços, que pode ocorrer naturalmente pela pressão existente no subsolo, ou pela elevação artificial, através do bombeio. O petróleo produzido nos poços, na maioria dos casos, escoar por linhas até uma estação coletora onde é bombeado até uma unidade de tratamento, através de uma rede de oleodutos, que também liga outras estações coletoras a esta unidade de tratamento, que chamaremos de estação central.

Para a produção de seus derivados, o petróleo geralmente passa por mais de uma refinaria até chegar ao consumidor final. O primeiro passo neste processo consiste em um tratamento da emulsão produzida, separando o óleo da água visando principalmente a medição fiscal, de onde são computados os pagamentos de impostos e *royalties*.

A variação de vazão provocada pela operação descentralizada das estações coletoras para a unidade de tratamento gera desequilíbrio no

processo de separação, além do aumento com custos de energia e de provocar uma falsa redução da capacidade de escoamento da rede devido aos picos de pressão. O processo de operação dessas redes é o assunto desse estudo.

1.2 Objetivo geral

Aplicação de um Otimizador em um Sistema Especialista para operação de uma Rede de Escoamento de Petróleo em tempo real.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Estudar a técnica de Otimização;
- Construir um Modelo Matemático para otimizar o problema estudado;
- Aplicar o Otimizador em um Sistema Especialista capaz de operar uma malha de escoamento;
- Avaliar a aplicação do Otimizador.

1.4 Problemática do Escalonamento de Bombas

A rede de escoamento de petróleo em campos terrestres consiste em um conjunto $N = \{1, \dots, n\}$ de estações satélites (SS) que coletam o fluido produzido pelos poços ao seu redor e, através de um conjunto de bombas e dutos, exportam o fluido acumulado para uma Estação Central (CS), onde esse fluido será processado. Essa rede é representada na Figura 1.1. Como é característico de campos maduros, o fluido processado na estação central é uma mistura de óleo e uma grande porcentagem de água. Na estação central, o óleo é separado por gravidade e enviado para processamento. A água é enviada para tratamento de onde segue para ser reinjetada ou descartada.

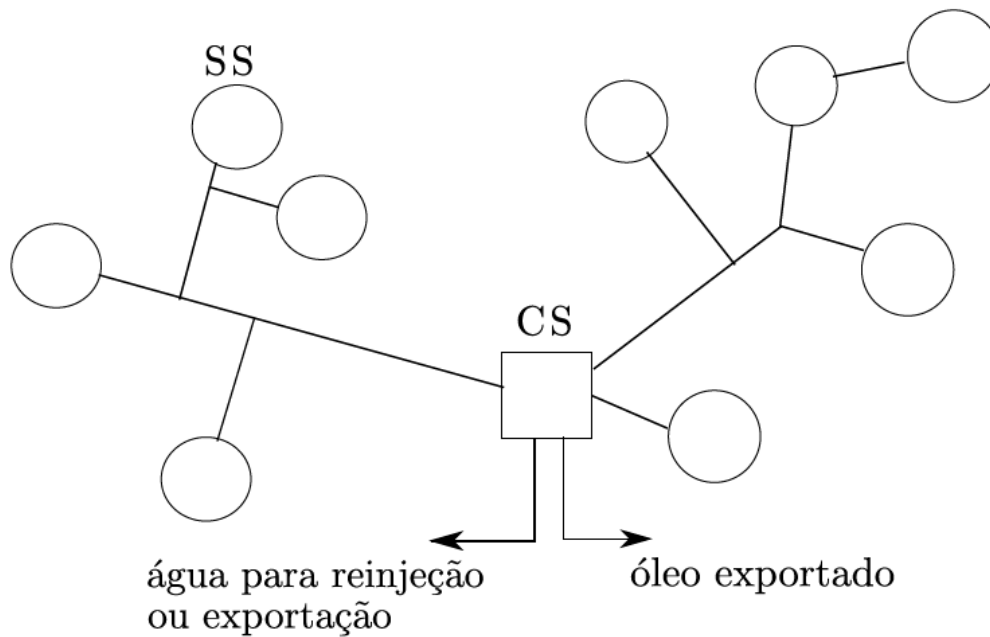


Figura 1.1: Rede de Escoamento de Petróleo

A estação Central é composta por uma série de tanques que devem prover um tempo de residência suficiente para permitir a separação adequada do óleo e da água por gravidade. As estações satélites, por outro lado, são compostas por um tanque de produção e por um conjunto de bombas que transferem a produção para a estação central como ilustrado na Figura 1.2. Em cada estação parte das bombas possuem motores com variador de velocidade, o que permite operá-las com rotação variável. As demais bombas seguem um algoritmo liga-desliga que, sucessivamente, liga as bombas quando o nível atinge valores máximos sucessivos, e desliga as bombas quando o nível atinge valores mínimos sucessivos. Dependendo da razão de produção dos poços, uma ou mais bombas devem permanecer ligadas para manter o nível nos tanques dentro de limites de operação.

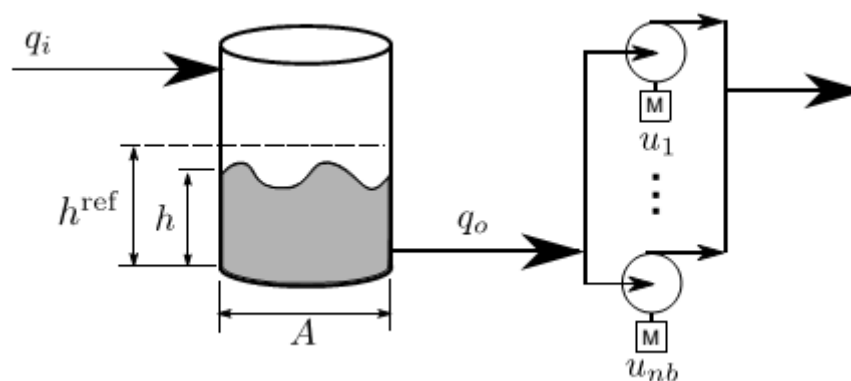


Figura 1.2: Estação satélite (SS)

Atualmente os campos petrolíferos possuem um alto grau de automação, sendo possível acompanhar desde os poços até o processo das estações coletoras, que inclui o envio do petróleo à estação Central, operados remotamente, funcionando 24 horas por dia, de forma ininterrupta. Por um sistema chamado *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), é realizado à distância o monitoramento de cada estação coletora. Os dados (pressão, nível, vazão e status das bombas) e os comandos (liga/desliga bombas e escrita de parâmetros) são transmitidos via rádio.

O fato de cada estação operar independente e descentralizada é um fator complicador, pois não há coordenação que previna a partida de bombas de diferentes estações ao mesmo tempo (ou próximas no tempo). Quando muitas bombas são acionadas ao mesmo tempo, a pressão no sistema de exportação pode experimentar uma elevação brusca a ponto de causar o desarme das bombas. Também, se muitas bombas forem ligadas ao mesmo tempo, a oscilação no fluido que chega à estação Central causa uma perturbação que dificulta o processo de separação.

A minimização da oscilação da vazão para a estação Central é particularmente importante em campos maduros, quando o conteúdo de água cresce sem o correspondente aumento no tempo de residência. A operação escalonada das bombas tem o objetivo de manter o nível das estações satélites dentro de faixas de controle e, ao mesmo tempo, minimizar as oscilações na vazão recebida pela estação Central.

Dentro da faixa de controle, as estações possuem controladores de nível que atuam na rotação das bombas com variador de velocidade buscando um *set-point* de nível ajustado dentro da faixa de controle. A sintonia desses controladores deve ser tal que permita um afastamento do nível de controle durante perturbações nas vazões de entrada para aproveitar a capacitância dos tanques e evitar a transferência das variações nas vazões de entrada para a saída. Por outro lado, a sintonia não deve ser demasiadamente lenta a ponto de permitir um afastamento do nível de controle, de chegar a acionar de uma bomba de rotação fixa, pois cada estação possui uma lógica no PLC (*Programmable Logic Controller*) que liga ou desliga bombas, dependendo do nível.

Esse trabalho, portanto, é voltado para o problema do escalonamento das bombas, se preocupando também com o problema de controle dos níveis dentro das faixas de controle. Esses dois aspectos são importantes para minimizar a variação da vazão total para a estação central e serão tratados nos capítulos seguintes.

1.5 Metodologia

Este projeto foi desenvolvido em conjunto com o CENPES/PETROBRAS, através de um grupo formado para otimização de uma rede de escoamento de petróleo. Neste trabalho, é proposto um modelo para resolver o problema de escalonamento de bombas. Foi utilizada a abordagem de Programação Quadrática Linear Mista. O modelo foi resolvido utilizando-se a ferramenta CPLEX da IBM por disponibilizar uma IDE que facilita a implementação e a geração de resultados.

Para testar o Modelo Otimizador, foram aplicadas as soluções obtidas na decisão da melhor operação de um Sistema Especialista para o Controle e Operação dessa malha, que foi modelado utilizando o MPA (Módulo de Procedimentos Automatizados), um modelador de alto nível que permite definir algoritmos em forma de fluxogramas, capazes de representar o conhecimento da melhor operação de uma planta industrial.

1.6 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado como segue: inicia-se com o Referencial Teórico no capítulo 2, onde tem-se uma revisão bibliográfica sobre o problema, contextualizando o tema Pesquisa Operacional, além de abordar as ferramentas utilizadas na modelagem. Em seguida no capítulo 3 é explanado a metodologia para obtenção do Modelo Otimizador para o escalonamento das bombas e a implementação do sistema no MPA.

No capítulo 4 são apresentados os resultados alcançados com a implantação do sistema, e uma discussão sobre esses resultados. Finalmente

no capítulo 5 faz-se um fechamento do trabalho, indicando as conclusões obtidas e sugestões de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Trabalhos relacionados ao Problema

Alguns autores trataram o tema otimização do escoamento de petróleo, utilizando diferentes técnicas para atingir este objetivo. Silva (1999) usou um algoritmo genético e programação linear para otimização de um sistema de escoamento de petróleo na Argentina.

Brasileiro (2005) também utilizou de algoritmo genético para otimizar o escoamento de petróleo, visando principalmente a economia de energia elétrica. O principal diferencial do algoritmo genético proposto por esta autora é utilização de operadores genéticos inteligentes, os quais baseiam o ponto de cruzamento e de mutação no intervalo de tempo em que ocorreu a inviabilidade para aumentar as chances de se gerar indivíduos viáveis.

Santana (2006) deu continuidade a este trabalho, calibrando e realizando ajustes nos parâmetros do algoritmo genético. As propriedades do fluido foram dados de entrada necessários para os modelos hidráulicos, cujas funções, das quais são compostos, se constituem em simples representação matemática do processo real, bem mais complexo.

Machado (2006) analisa a incorporação de outras técnicas a este método de otimização com o propósito de aumentar a sua eficiência e torná-lo aplicável ao problema da otimização da operação de sistemas de escoamento de petróleo.

Todos estes projetos foram feitos baseados em uma modelagem fenomenológica do processo, englobando fenômenos do processo como conservação da massa, energia e quantidade de movimento, incluindo detalhes como a hidráulica dos fluidos, viscosidade, densidade, vazão e pressão.

Borges (2013) conseguiu simplificar a problemática usando uma modelagem não-fenomenológica utilizando sistemas fuzzy, justificando que o modelo de escoamento dito fenomenológico envolve componentes empíricos, e o ajuste dos parâmetros existentes nas equações (chamado de “calibração do modelo”), também é uma tarefa árdua. Esta afirmativa é apoiada na justificativa

de Machado (2006) para utilizar a técnica dos algoritmos genéticos, devido à dificuldade de representar alguns parâmetros em equações matemáticas.

Arenales (2007) afirma que para formular um Modelo Matemático, é necessário fazer simplificações razoáveis do sistema ou problema, mas que este modelo deve ser suficientemente detalhado para captar os elementos essenciais do problema, ao mesmo tempo em que deve ser suficientemente tratável por métodos de resolução.

Adotando os argumentos de Borges (2013) sobre modelagem não-fenomenológica, este projeto aborda a problemática da malha de escoamento, simplificando o problema, por reduzir as variáveis, dando foco no objetivo principal de manter o somatório de vazão constante na chegada da estação destino.

Nos trabalhos encontrados sobre otimização do escalonamento de bombas de redes de escoamento de petróleo, a abordagem é feita em Sistemas de Apoio à Decisão (SAD). De acordo com Borges (2013), SAD são sistemas desenvolvidos para apoiar a solução de um problema, aperfeiçoando a tomada de decisão. De modo que apesar de ser identificada uma solução ótima (como a necessidade de atuar ligando ou deligando determinada bomba), estes sistemas não atuam diretamente no processo, dependendo da atuação do operador para que a decisão se traduza em ações no processo. Com esta restrição, para aplicação de um SAD em uma rede de escoamento de maiores proporções, seria necessário um operador com dedicação exclusiva para esta atividade, o que poderia inviabilizar o projeto.

Neste projeto é aplicado um otimizador, modelado matematicamente, em um sistema que visa gerenciar a malha de escoamento monitorando em tempo real, decidindo e atuando na operação para manter a estabilidade de vazão. Desta forma podemos caracterizá-lo como um Sistema Especialista.

Conforme será apresentado no capítulo 3, o problema foi consolidado como um problema de otimização com a função objetivo quadrática com restrições lineares, e variáveis de decisão contínua e discretas. O problema é classificado como um problema do tipo Programação Quadrática Inteira Mista (*Mixed Integer Quadratic Program*) que para ser resolvido é imprescindível a utilização de métodos computacionais. Desta forma, se faz necessário apresentar nesta seção do trabalho definições sobre o tema de Otimização.

2.2 Otimização e Pesquisa Operacional

Arenales (2007) define Pesquisa Operacional (*operational research* em inglês) como sendo a denominação científica para tomada de decisões, fazendo uso de modelos matemáticos, que procura determinar como melhor projetar e operar um sistema, usualmente sob condições que requerem a alocação de recursos escassos. O surgimento deste termo está ligado à invenção do radar na Inglaterra em 1934. A análise científica do uso operacional de recursos militares foi iniciada na Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de determinar a melhor utilização efetiva dos recursos militares limitados. Após a guerra a pesquisa operacional evoluiu rapidamente na Inglaterra e Estados Unidos, com projetos de apoio a decisões de operações na força aérea.

Arenales (2007), afirma que a pesquisa operacional passou a ser aplicada em problemas dos setores públicos e privados, como em setores da indústria e financeiros nas década de 1950 e 1960. Já na primeira conferencia internacional de Pesquisa Operacional, em 1957, os cientistas americanos já apresentaram modelos e métodos matemáticos em temas como teoria dos estoques, teoria de filas, teoria de jogos, fluxo em redes e otimização linear. Foi assim que surgiu o método simplex para resolução de problemas de Programação Linear.

Segundo Arenales (2007), atualmente a Pesquisa Operacional tem sido abordada nos componentes científico e tecnológico. O componente científico está relacionado a ideias e processos para articular e modelar problemas de decisão, além de métodos matemáticos para otimizar sistemas numéricos gerados pelos dados do modelo. O componente tecnológico está relacionado a dados gerados por ferramentas de *softwares* e *hardwares* utilizados para gerar e otimizar modelos e reportar resultados.

A modelagem define as variáveis e as relações matemáticas para descrever o comportamento do sistema ou problema real. Tanto Montevenchi (2013) como Arenales (2007), citam a necessidade de seguir 5 passos em um projeto de Pesquisa Operacional, representados na Figura 2.1, sendo eles:

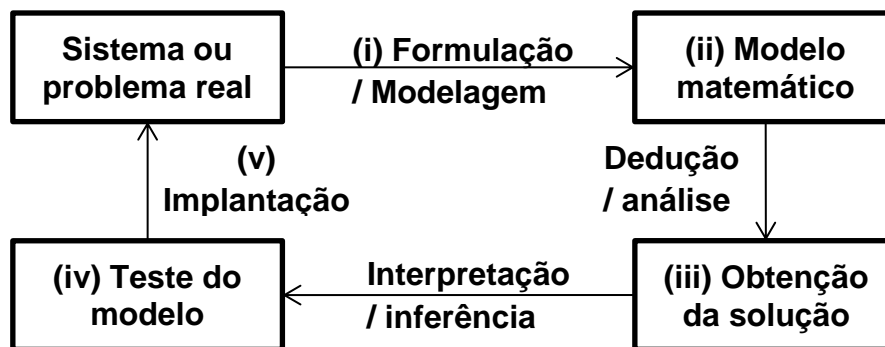


Figura 2.1: Processo de Modelagem

Fonte: adaptado de Arenales, 2007

(i) **Formulação do problema:** Consiste em estudar o sistema e estabelecer de uma maneira bem definida o problema a ser considerado. Para isto é necessário determinar os objetivos a atingir, as restrições que devem ser considerada. Para formular um problema é preciso identificar, definir e especificar as variáveis de decisão, sendo que a determinação da relação entre estas variáveis (função objetivo) é o objetivo da fase da pesquisa denominada construção do modelo;

(ii) **Construção do modelo matemático:** Nesta fase se especifica as expressões quantitativas para o objetivo e as restrições do problema em termos de suas variáveis de decisão. São utilizados símbolos matemáticos para representar as variáveis (X_1, X_2, \dots) além de três conjuntos fundamentais de elementos, sendo eles: variáveis de decisão são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo. Parâmetros são valores fixos no problema. Restrições limitam as variáveis de decisão a seus valores possíveis (ou viáveis) de modo a levar em conta as limitações físicas do sistema. Função objetivo é uma função matemática que define a qualidade da solução em função das variáveis de decisão.

(iii) **Obtenção da solução:** Esta etapa é realizada com o uso de técnicas de otimização bem definidas, quando a solução for a melhor possível para o problema real dizemos que o modelo é dito de solução ótima;

(iv) **Teste do modelo e avaliação da solução:** Consiste em verificar a validade do modelo, se ele prediz ou não os efeitos relativos das linhas de ação alternativas com suficiente precisão de maneira a permitir uma satisfatória decisão;

(v) Implantação e acompanhamento da solução (manutenção): Implantar a solução final é difícil, pois é preciso assegurar a solução, sendo necessário participar diretamente e corrigir imperfeições que sejam descobertas. De acordo com as conclusões e resultados obtidos a partir da modelagem inicial, pode ser necessária a reformulação do problema. Dessa forma, o ciclo de modelagem pode ser repetido quando os resultados não são satisfatórios.

Dentre os métodos mais comuns que são usados na Pesquisa Operacional, Montevenchi (2013), cita as técnicas de otimização clássica ou tradicional, que são associadas com o procedimento de cálculo do máximo ou mínimo. A Otimização é definida por Axehill (2008) como o processo de encontrar uma solução ótima para um problema modelado. Resumidamente, os valores de máximo e mínimo da curva representada por uma equação podem ser obtidos pelo conjunto das primeiras derivadas iguais a zero. As áreas de cálculo necessárias são: diferenciação, integração, derivadas parciais, e os multiplicadores de Lagrange. Estas técnicas matemáticas as quais são aplicadas para otimização de problemas são capazes de diretamente selecionar a melhor decisão, geralmente dependendo do tamanho do problema, sem a necessidade de muitos passos iterativos.

Para resolver os modelos matemáticos que podem surgir na prática não se tem apenas uma técnica, em vez disso, o tipo e a complexidade do modelo matemático é que determina o método de solução. Arenales (2007) define os modelos de Programação Matemática como um tipo de modelo matemático que procuram representar o problema real. São exemplos de Programação Matemática (otimização matemática), a Programação Linear (otimização linear) e a Programação Quadrática (otimização quadrática), que é um tipo de Programação Não-linear (otimização não-linear).

De acordo com Arenales (2007), a técnica mais utilizada para resolver os modelos é a Programação Linear, que é um problema de Programação Matemática cujas funções objetivo e restrições são lineares e contínuas (reais). Lisboa (2002) define programação linear como um problema geral utilizado para otimizar (maximizar ou minimizar) uma função linear de variáveis, chamada de "função objetivo", sujeita a uma série de equações ou inequações lineares, chamadas restrições.

Segundo Lisboa (2002) a formulação do problema a ser resolvido por programação linear segue alguns passos básicos, como a definição do objetivo básico do problema, definição das variáveis de decisão envolvidas(onde a função objetivo é matematicamente especificada) e definição das restrições em que as variáveis estão sujeitas (geralmente representadas por inequações).

O problema geral de programação linear é definido por Arenales (2007) da seguinte forma:

$$\text{Otimizar: } Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$\left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq \\ = \\ \geq \end{array} \left\{ \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Onde:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\ g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) &= a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + \dots + a_{in}x_n, \end{aligned}$$

para $i = 1, \dots, m$

- n é o número de variáveis
- m é o número de restrições do problema
- i é o índice de uma determinada restrição ($i = 1, 2 \dots m$)
- j é o índice de uma determinada variável ($j = 1, 2 \dots n$)
- c_i é o coeficiente (constante) da variável x_i da função objetivo
- a_{ij} é o coeficiente (constante) da variável x_i da j -ésima restrição

Arenales (2007) define Programação Inteira como um caso de Programação Linear que possui variáveis inteiras. Para este problema há uma técnica particular de solução, chamada de Método *Branch-and-Bound*, que se baseia na montagem de um diagrama tipo árvore, em que cada ramo é uma opção de solução inteira. Apenas alguns ramos são testados e para cada tentativa, o Método Simplex é utilizado. Se todas as variáveis forem inteiras, então esse problema pode ser classificado como de Programação Inteira. Se todas as variáveis forem 0 ou 1, o problema é classificado de Programação Binária ou um Programação de Inteiros 0-1. Se algumas variáveis forem números fracionários e outras forem números inteiros, então o problema é chamado Programação Inteira Mista.

Secchi (2015) define Programação Não Linear como um problema com função objetivo e/ou restrições não-lineares. Afirma que a maioria dos

algoritmos de programação não linear procuram linearizar localmente a fronteira da região viável, gerando restrições lineares.

Segundo Lachtermacher (1956), um problema de Programação Quadrática tem a sua solução ótima encontrada pelos algoritmos de resolução de problemas não lineares sem dificuldades. Uma função quadrática de n variáveis $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ é uma função que pode ser escrita da seguinte forma:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n a_i x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (2.3)$$

Ou seja, a função quadrática é a soma de termos envolvendo quadrado de variáveis ($a_i x_i^2$) e produto de duas variáveis ($b_{ij} x_i x_j$). Então uma função quadrática de uma variável é dada por $f(x_1) = ax_1^2$, de duas variáveis por $f(x_1, x_2) = ax_1^2 + bx_1 x_2 + cx_2^2$ e assim por diante.

Segundo Lachtermacher (1956), um problema de programação, com modelo de maximização ou minimização, é dito de Programação Quadrática se a função-objetivo for uma função quadrática e o conjunto de restrições apresentar somente restrições lineares (igualdades e desigualdades). Em um caso de Programação Quadrática de Maximização em que a função-objetivo é uma função côncava, o algoritmo encontrará o máximo global. Já num caso de Programação Quadrática de Minimização em que a função-objetivo é uma função convexa, o algoritmo encontrará o mínimo global.

Secchi (2015) define Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) como um problema de Programação Inteira Mista que há relações não lineares na função objetivo ou nas restrições. Axehill (2008) define Programação Quadrática Inteira-Mista (PQIM) como um caso especial de Programação Não Linear Inteira Mista, sendo semelhante a um problema de Programação Quadrática (equação 2.3), porém como as variáveis de otimização possuem tanto valores reais como inteiros, esta ligeira modificação transforma o problema em um problema NP-difícil.

Secchi (2015) classifica os algoritmos existentes para problemas PQIM como: Métodos *branch and bound*: uma árvore binária é empregada para representar as combinações 0-1, a região viável é sistematicamente

particionada em subdomínios e limites inferiores e superiores são gerados em diferentes níveis da árvore binária; Métodos dos planos de corte: a região viável não é dividida em subdomínios, mas novas restrições (chamadas de planos de cortes) são geradas a cada estágio e adicionadas ao conjunto de restrições, reduzindo a região viável até obter uma solução ótima; Métodos de decomposição: a estrutura matemática do modelo é explorada através de partições das variáveis, dualidade e métodos de relaxação; Métodos baseados em lógica e disjunções: técnicas de inferência simbólica, em termos das variáveis binárias, são utilizadas para restringir a região viável.

2.2.1. General Algebraic Modeling System (GAMS)

Existe uma grande variedade de programas computacionais para resolver problemas de programação não-linear. Esses programas, geralmente, agrupam uma série de algoritmos de otimização, chamados de *solvers* (solucionadores em inglês) na linguagem computacional. Em meio aos vários programas existentes, este trabalho destaca o Programa GAMS, utilizado para resolução da otimização do problema apresentado. O GAMS é uma Linguagens de Modelagem e foi projetada para o desenvolvimento e solução de modelos de programação matemática complexa.

Silva (2010) destaca a significância das Linguagens de Modelagem, visto que os problemas analisados estão se tornando cada vez mais complexos, e as Linguagens de Modelagem propiciam que os modeladores dediquem cada vez mais tempo para solucionar problemas referentes ao modelo, e não a implementação computacional.

O GAMS possui uma linguagem de alto nível para a formulação de modelos de pesquisa operacional. Segundo Silva (2010), esta é uma das ferramentas, para este campo, mais difundida em todo mundo. Ele foi especialmente idealizado para modelagem de problemas de programação linear, não-linear, inteira e mista. O programa possui uma versão estudante disponível na internet, através de seu site (www.gams.com), e a versão completa obtida através de licença concedida pelos administradores do programa.

A estruturação no GAMS é representada por Silva (2010) na Figura 2.2: SETS – definição de conjuntos; índices, elementos de vetores, etc. PARAMETERS – são as constantes do problema; VARIABLES – fatores a serem otimizados; EQUATIONS – módulo onde são expressas as restrições do problema e a função objetivo; MODEL é usado para reunir equações em grupos e rotulá-los de modo que possam ser resolvidos; SOLVE – dá início ao processo de otimização. É nesse comando que se define o tipo de algoritmo a ser usado, se ocorrerá maximização ou minimização, e qual é a função a ser otimizada (função-objetivo).

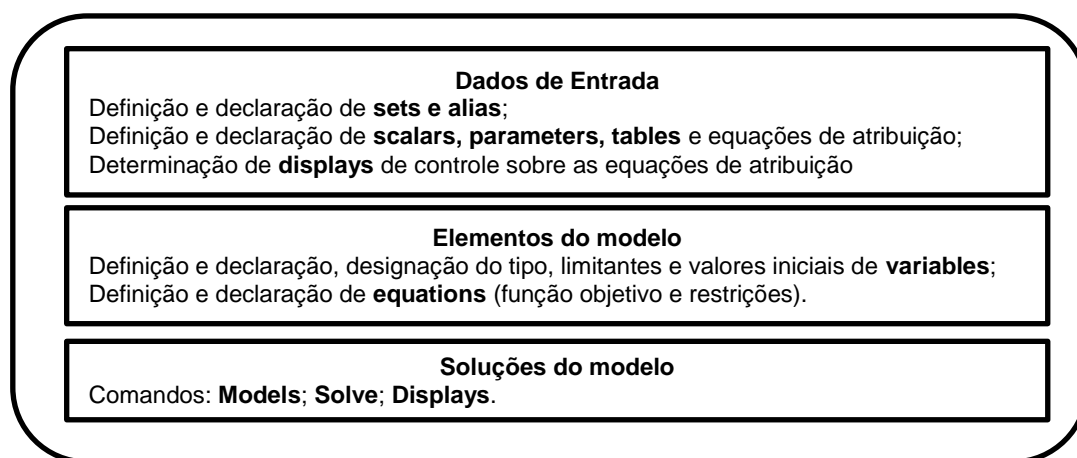


Figura 2.2: Estrutura geral do modelo GAMS
fonte: Silva (2010)

2.2.2. CPLEX

IBM ILOG CPLEX Optimization Estúdio (informalmente conhecido simplesmente como CPLEX) é uma ferramenta de otimização. Esta foi a ferramenta utilizada para auxiliar na implementação do modelo proposto.

Segundo Silva (2010), a sigla CPLEX é a combinação da letra C, em referência à linguagem de programação C utilizada no desenvolvimento deste algoritmo, com a terminação PLEX, em referência ao algoritmo simplex de solução de problemas de Programação Linear. CPLEX foi lançada em 1988 com suporte para solucionar problemas de Programação Linear por meio do método primal simplex. Posteriormente, este algoritmo incorporou o suporte para utilizar o método para problemas de programação linear e programação quadrática; incorporou o algoritmo *Branch-and-Bound*, para solucionar

problemas de Programação Quadrática Inteira Mista e Programação Inteira Mista com Restrições Quadráticas; incorporou heurísticas de pré-processamento de dados, para gerar boas soluções iniciais; e incorporou técnicas de programação por restrições, para melhorar o desempenho de busca. Além disso, o CPLEX passou a utilizar um algoritmo *branch-and-cut* com cortes com famílias de desigualdades válidas e genéricas.

Segundo Fagundes (2014), o software de otimização CPLEX usa a ferramenta de otimização clássica *Branch-and-Bound* (a qual originalmente foi formulada para Programação Linear Inteira Mista) para reconhecer problemas de ordem quadrática, ou Programação Quadrática Inteira Mista, desde que sejam atendidas as seguintes condições: Todas as restrições devem ser lineares; A função objetivo deve ser uma soma de termos, onde os termos são lineares e quadráticos; Para todos os valores das variáveis, a parte quadrática da função objetivo deve ter um valor positivo se o problema é de minimização ou um valor negativo caso o problema seja de maximização. Portanto, o solver CPLEX foi utilizado para resolver o modelo matemático implementado neste trabalho.

2.2.3. O Algoritmo *SIMPLEX*

Segundo Belfiore (2012) dos diversos algoritmos ou métodos de solução para a determinação da solução ótima de um modelo, o método Simplex, desenvolvido por George B. Dantzig em 1947, é o mais conhecido e utilizado. Sendo definido como um procedimento algébrico iterativo que parte de uma solução básica factível inicial e busca, a cada iteração, uma nova solução básica factível com melhor valor na função objetivo, até que o valor ótimo seja atingido.

Lisboa (2002) apresenta o seguinte procedimento para o Método Simplex para problemas de maximização:

Passo 1: Introduzir as variáveis de folga; uma para cada desigualdade.

- Passo 2: Montar um quadro para os cálculos, colocando os coeficientes de todas as variáveis com os respectivos sinais e, na última linha, incluir os coeficientes da função objetivo transformada.
- Passo 3: Estabelecer uma solução básica inicial, usualmente atribuindo valor zero às variáveis originais e achando valores positivos para as variáveis de folga.
- Passo 4: Como próxima variável a entrar na base, escolher a variável não básica que oferece, na última linha, a maior contribuição para o aumento da função objetivo (ou seja, tem o maior valor negativo). Se todas as variáveis que estão fora da base tiverem coeficientes nulos ou positivos nesta linha, a solução atual é ótima. Se alguma dessas variáveis tiver coeficiente nulo, isto significa que ela pode ser introduzida na base sem aumentar o valor da função objetivo. Isso quer dizer que temos uma solução ótima, com o mesmo valor da função objetivo.
- Passo 5: Para escolher a variável que deve deixar a base, deve-se realizar o seguinte procedimento:
- a) Dividir os elementos da última coluna pelos correspondentes elementos positivos da coluna da variável que vai entrar na base. caso não haja elemento algum positivo nesta coluna, o processo deve parar, já que a solução seria ilimitada.
 - b) O menor quociente indica a equação cuja respectiva variável básica deverá ser anulada, tornando-se variável não básica.
- Passo 6: Usando operações válidas com as linhas da matriz, transformar o quadro de cálculos de forma a encontrar a nova solução básica. A coluna da nova variável básica deverá se tornar um vetor identidade, onde o elemento 1 aparece na linha correspondente à variável que está sendo anulada.
- Passo 7: Retornar ao passo 4 para iniciar outra iteração.

Para resolver os problemas de minimização utilizando o mesmo algoritmo uma função $z(x)$ é matematicamente análoga à maximização da negativa desta função ($-z(x)$).

2.2.4. O Algoritmo *Branch-and-Bound*

Villela (2008) define O *Branch-and-Bound* (em português, ramificar e limitar) como um algoritmo baseado no processo de partição e conquista, que consiste em quebrar um problema difícil (em geral, NP-completo) em vários problemas menores, de fácil resolução, para posteriormente juntar as informações obtidas para resolver o problema original. A enumeração sistemática das possíveis soluções é feita procurando sempre eliminar grupos de soluções menos proveitosas. Em geral, esse algoritmo é muito utilizado para achar a solução ótima de problemas de otimização que envolvem variáveis inteiras.

Segundo Menco (2013) a forma de divisão em problemas menores parte do princípio da separação de uma das variáveis de decisão inteiras, em um problema relaxado, criando uma espécie de ramificação (a partir de um nó), como em uma árvore. Uma das formas de relaxação consiste em, temporariamente, ignorar as restrições de integralidade do problema, tornando-o um problema de Programação Linear, mais simples de resolver. A partir deste, pode-se usar para resolvê-lo o método Simplex. Considera-se que o conjunto de soluções viáveis do problema original esteja contido no conjunto de soluções viáveis do problema relaxado (que desconsidera a condição de variáveis inteiras). Se o problema relaxado não tem solução viável, então também não há soluções inteiras para o problema original. Se uma solução ótima do problema relaxado é viável no problema original, então ela é uma solução ótima.

Menco (2013) apresenta um procedimento para o método *Branch-and-Bound* em seis passos:

Passo 1: Resolver o problema original usando programação linear, por exemplo, pelo método Simplex. Se a resposta satisfaz a restrição inteira, esta é a solução ótima. Sendo assim, pare, senão, ir ao passo 2.

Passo 2: Encontrar uma solução viável que preencha a restrição inteira para uso como um limite superior. Usualmente para isso, arredonda-se a variável.

Passo 3: Ramificar pela variável de decisão do passo 1 que não tenha um valor inteiro. Caso todas as variáveis não sejam inteiras, iniciar a ramificação pela de maior valor do resíduo decimal. Dividir o problema em dois subproblemas baseados nos valores inteiros que estão imediatamente abaixo ou acima do valor não inteiro. Esses limites deverão ser colocados na restrição do problema.

Passo 4: Criar nós no topo desses novos ramos pela solução dos novos problemas.

Passo 5: a. Se um ramo leva a uma solução inviável por programação linear, descarte o nó para continuidade da análise.

b. Se um ramo leva a uma solução viável por programação linear, mas não é uma solução inteira vá para o passo 6.

c. Se o ramo leva a uma solução inteira viável, examine o valor da função objetivo. Se este valor é igual ao limite inferior, uma solução ótima foi alcançada. Se ele não é igual ao limite inferior, mas ele é menor que o limite superior, adote-o como um novo limite superior e vá para o passo 6. Finalmente, se ele é maior que o limite superior, descarte esse ramo.

Passo 6: Examine ambos os ramos novamente e adote como limite superior o valor máximo da função objetivo para todos os nós finais. Se o limite inferior é igual ao limite superior, pare. Se não, volte ao passo 3.

2.3 Automação e controle de processos

O verbete “automação” no dicionário Aurélio (2000) é definido como o “sistema automático pelo qual os mecanismos controlam seu próprio funcionamento, quase sem a interferência do homem.” A automação industrial é definida por Duarte (2015) como a utilização de qualquer dispositivo eletroeletrônico ou mecânico que substitui algumas tarefas humanas ou permite o pleno controle de máquinas, equipamentos e processos.

Segundo Fichman (2015), o controle de processo é o subsistema responsável por manter a planta trabalhando em torno de uma condição de processo desejável. Esse controle pode ser efetuado manipulando variáveis de processo discretas e analógicas. Um sistema de controle automático tem como objetivo manter as variáveis de um processo, tais como temperatura, pressão, nível e vazão, em um valor de operação desejado. Os processos industriais são dinâmicos por natureza e mudanças estão sempre ocorrendo. Se ações não são tomadas, as variáveis importantes, relacionadas com segurança, qualidade do produto e produtividade não serão mantidas nas condições de projeto.

São necessários sensores no processo que transmitam as informações necessárias. Abordaremos neste trabalho a mediação de nível e vazão. Para a medição de nível, nas estações do nosso objeto de estudo são utilizados medidores de nível do tipo radar. Duarte (2015) explica o princípio de operação destes instrumentos, que através da reflexão da onda gerada pelo transdutor, quando encontra a interface com o produto cujo nível se deseja medir ou, mais precisamente, o tempo gasto pela onda desde o instante em que é gerada, até o instante em que retorna àquele transdutor, depois de refletir-se na superfície. Os medidores do tipo radar possuem antenas onde ocorrem a emissão e a recepção das ondas eletromagnéticas. O sinal refletido é captado pela própria antena emissora e é utilizado na medição do nível do líquido existente no interior de um tanque.

Já na medição de vazão das estações do nosso objeto de estudo são utilizados medidores de vazão ultrassônico. Segundo Duarte (2015), este tipo de medidor de vazão se fundamenta no princípio da propagação de som em um líquido. Os pulsos sonoros são gerados, em geral, por um transdutor piezoelétrico, que transforma um sinal elétrico em vibração, que é transmitida no líquido como um trem de pulsos. Seu funcionamento se baseia na medição da diferença de velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos.

Uma das ações do sistema implementado neste trabalho é o ajuste dos parâmetros de controle automático das bombas que possuem variador de frequência. Segundo Ribeiro (2010) O controle automático do processo contínuo se baseia no algoritmo que combina as três ações clássicas: Proporcional, Integral e Derivativa e por isso é também chamado de controle

PID. Na figura 2.3 temos a representação de uma malha de controle contínuo com a realimentação negativa (feedback) e com o algoritmo de controle PID.



Figura 2.3 Controle PID de processo contínuo

Fonte: Ribeiro (2010)

Segundo Ribeiro (2010) no controle contínuo diz-se ter a realimentação porque se mede na saída e atua na entrada do processo. Esta realimentação é negativa porque a atuação é para estabilizar a variável: se ela tender a subir por algum distúrbio o controlador a faz baixar ou se a variável tender a descer por causa de outro distúrbio, o controlador a faz subir. As variáveis envolvidas são, na maioria dos casos, pressão, temperatura, vazão, nível e análise.

A ação proporcional (KP) é definida por Ribeiro (2005) como a ação corretiva do controlador que é proporcional ao valor do desvio entre a medição e o ponto de ajuste. A ação proporcional é assim chamada porque a posição do elemento final é proporcional a amplitude do erro entre a medição e o ponto de ajuste. É uma ação de controle contínua, analógica, uniforme em que saída do controlador é proporcional a amplitude do erro.

A ação integral (TI) é proporcional à integral, no tempo, do erro entre a medição e o ponto de ajuste. É definida por Ribeiro (2005) como a ação corretiva proporcional a duração do erro existente entre a medição e o ponto de ajuste. A ação integral discrimina o erro entre a medição e o ponto de ajuste pela sua duração: O erro que dura muito tempo para ser eliminado produz uma grande ação corretiva, o erro de curta duração gera uma pequena ação integral de correção.

A ação derivativa (TD) é definida por Ribeiro (2005) como a ação corretiva proporcional à derivada em relação ao tempo do erro entre a medição e o ponto de ajuste. Esta ação detecta a variação (aumento ou diminuição) do

erro entre a medição e o ponto de ajuste e fornece uma saída proporcional a esta taxa de variação.

Segundo Ribeiro (2005) A sintonia do controlador envolve os ajustes da banda proporcional, do tempo integral e do tempo derivativo. O ajuste da banda proporcional equivale ao ajuste do ganho do controlador. Os ajustes do tempo integral e do tempo derivativo implicam no atraso e/ou adiantamento da ação corretiva. Estes ajustes equivalem aos ajustes do ângulo de fase da ação corretiva.

2.4 Sistemas Especialistas

O modelo matemático de otimização foi aplicado em um Sistema Especialista implementado para ser capaz de operar uma rede de escoamento de petróleo. Campos (2004) afirma que “qualquer aplicação computacional que execute tarefas, consideradas pelos Humanos como ‘inteligentes’, pode ser denominado um sistema baseado em Inteligência Artificial” e classifica os Sistemas Especialistas como uma das técnicas de Inteligência Artificial que mais possuem aplicações.

Os Sistemas Especialistas, segundo Luger (2014), são sistemas que usam o conhecimento específico de um domínio de problema para conseguir um desempenho com “qualidade de especialista” naquela área de aplicação, emulando a metodologia e a atuação do especialista humano. Esses programas tratam de uma série de problemas. Luger (2014) lista as categorias destes problemas, sendo que destacam-se os seguintes: Interpretação (formar conclusões de alto nível de coleções de dados brutos); Predição (projetar consequências prováveis de situações indicadas); Monitoramento (comparar o comportamento observado de um sistema com o seu comportamento esperado); Controle (governar o comportamento de um ambiente complexo).

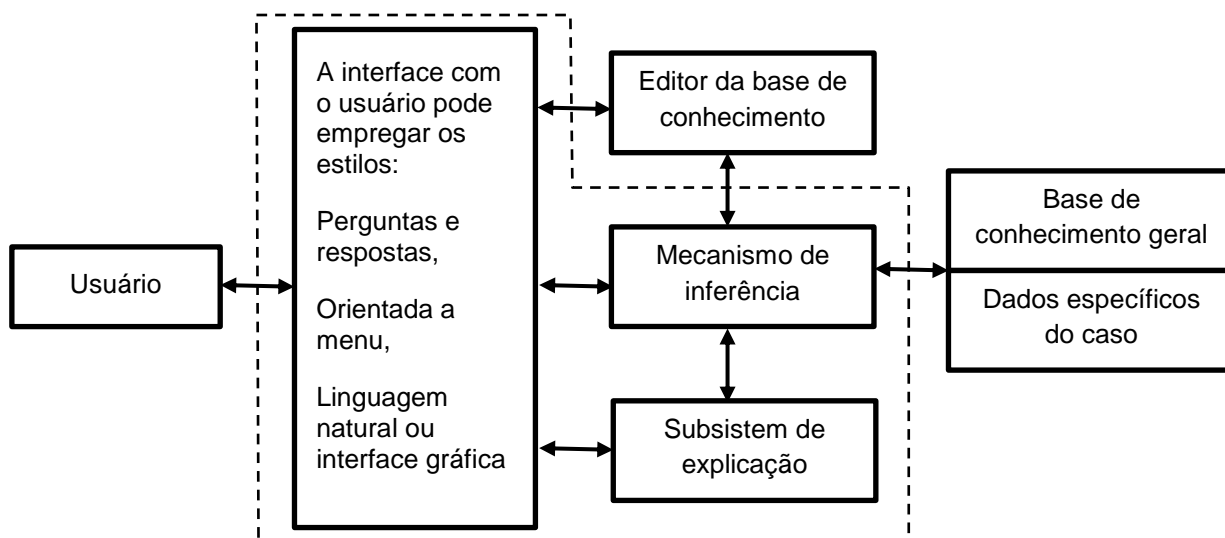


Figura 2.4: Arquitetura de um Sistema Especialista para domínio particular
Fonte: Luger, 2014

A figura 2.4 mostra os componentes de um Sistema Especialista, que segundo Luger (2014) são:

(i) Interface de Usuário: o usuário interage com o sistema através de uma interface que tem por objetivo simplificar a comunicação e ocultar boa parte da complexidade, como a estrutura interna da base de regras;

(ii) Base de Conhecimento: é o coração do sistema especialista, onde contém o conhecimento de um domínio particular de aplicação. Em um sistema especialista baseado em regras, este conhecimento é representado na forma de regras “se... então...” A base de conhecimento armazena tanto o conhecimento geral como informações específicas do caso;

(iii) Motor de Inferência: aplica o conhecimento, que se encontra na base de conhecimento, na solução de problemas reais. Ele é, essencialmente, um interpretador da base de conhecimento;

(iv) Dados Específicos do Caso: informações como fatos, conclusões e outras informações relevantes ao caso em consideração. Estas informações são armazenadas separadamente da base de conhecimento;

(v) Subsistema de Explicação: permite que o programa explique sua linha de raciocínio ao usuário, como justificativas para as conclusões do sistema;

(vi) Editor da Base de Conhecimento: estes editores ajudam o programador a localizar e corrigir erros na execução do programa, frequentemente acessando a informação fornecida pelo subsistema de

explicação. Estes editores também podem auxiliar na adição de conhecimento novo.

Campos (2004) fala da aplicação de Sistemas Especialistas da linha cognitiva presente nos Sistemas Supervisórios. Os Supervisórios em um ambiente de automação viabilizam: integração dos diversos equipamentos e dispositivos controladores de processos, monitoração de variáveis, comandos remotos, passagens de parâmetros e *set-points*, visualização gráfica da planta industrial e monitoração de alarme. Estes sistemas são implementados computacionalmente e possuem uma interface homem máquina (IHM) para permitir a alimentação dos parâmetros necessários, além de produzir relatórios e a apresentação gráfica dos processos. A característica primordial dos sistemas supervisórios é a necessidade dos conhecimentos fornecidos pelos seus operadores, como, por exemplo, receitas, dosagens e parâmetros de correção.

2.4.1. Módulo de Procedimentos Automatizados (MPA)

O Sistema Especialista para a operação de uma rede de escoamento de petróleo foi modelado no Software MPA. Segundo o TECGRAF (2016), o sistema MPA é uma ferramenta que adota uma linguagem gráfica de fluxogramas para a definição dos procedimentos de monitoração, diagnóstico e atuação sobre plantas industriais. Este software foi desenvolvido pela Petrobras em parceria com a PUC-Rio.

O MPA é capaz de atuar como sendo um operador do sistema supervisório, monitorando as variáveis e atuando para controlá-las. O MPA permite a automação de equipamentos industriais através da definição de manobras de operação. Segundo o TECGRAF (2016), o MPA foi desenvolvido objetivando a automação das plataformas de petróleo, automatizando procedimentos executados remotamente por operadores humanos, mas à medida que teve sua utilização difundida, deixou de ser um equipamento apenas de manobras, combinando automação, diagnóstico e monitoração. Portanto pode-se considerar o MPA como sendo uma ferramenta de modelagem de Sistemas Especialistas.

Segundo o TECGRAF (2015), o MPA é composto de um servidor de execução e um aplicativo de configuração e gerência (denominado aplicativo cliente). O servidor é um processo no sistema operacional na planta controlada que contém o executor de diagramas do MPA e recebe comandos de controle do aplicativo cliente. Esses comandos permitem realizar operações no executor de diagrama, tais como, iniciar a execução de uma manobra de operação ou alterar condições de equipamentos através de seus pontos de controle. O executor de diagramas é responsável por realizar manobras de operação sobre os equipamentos da plataforma, interagindo com o sistema supervisório. Essa interação é feita através de uma ponte de comunicação *OLE for Process Control* (OPC).

Na figura 2.5, o TECGRAF (2015) descreve o processo de utilização do MPA, que inicia-se com a pré-configuração, onde são fornecidas informações sobre as classes de equipamentos e funções auxiliares. Em seguida são implementados a configuração de planta e diagramas. Estas informações são enviadas pelo aplicativo cliente ao servidor de execução e são interpretadas pelo executor de diagramas do MPA, que efetivamente opera os equipamentos através do sistema supervisório.

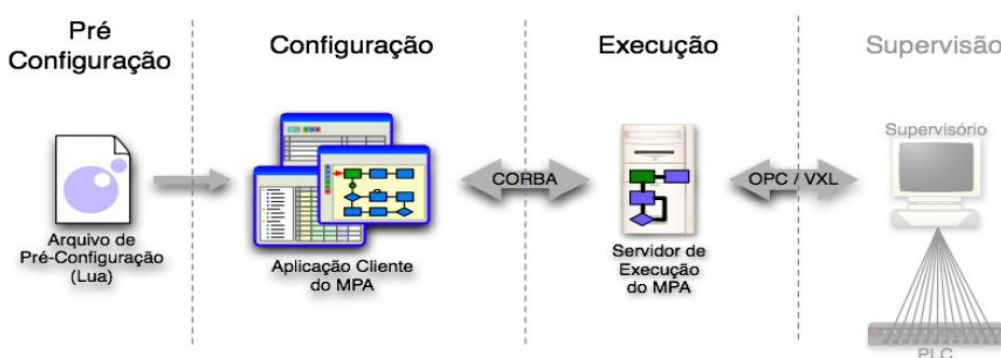


Figura 2.5 Processo de utilização do MPA
Fonte: Tecgraf (2015)

Faller (2009) afirma que o MPA foi desenvolvido como uma ferramenta gráfica para automatização de procedimentos com base em fluxogramas, com a lógica descrita em blocos funcionais e tomadas de decisão. Os blocos de função são programados em Lua, uma linguagem de script desenvolvida na PUC-Rio. O sistema está dividido em dois programas: cliente e servidor. No primeiro, elabora-se o algoritmo de automação ou controle representado através de fluxogramas, além de descrever os equipamentos da planta industrial. Já o programa servidor, ao se conectar com o sistema supervisório

de automação através de uma rede, é capaz de ler e escrever os valores de *set-point* de pressão e temperatura, por exemplo, e comandar manobras, como abertura de válvulas.

Campos (2004) cita vários exemplos de Sistemas Especialistas aplicados a plantas industriais. Os primeiros trabalhos com o MPA foram aplicados na colocação de plataformas em operação (as chamadas partidas de planta). Este tipo de procedimento caracteriza-se como crítico em função da necessidade de controle de inúmeros subsistemas que compõem o parque industrial de produção. Esta atividade não é cotidiana, visto que, as frequências de partida podem ser mensais, semestrais ou até mesmo anuais, o que aumenta o risco na tomada de decisões inadequadas. Os sistemas especialistas auxiliam os operadores neste processo, visto que, os conhecimentos que marcaram com sucesso partidas anteriores foram agregados ao sistema e agora serão usados com segurança.

Mas Campos (2004) cita também Sistemas Especialistas para controles avançados para estabilização de plantas através de diagnóstico, ajustes dos parâmetros de controle e atuando diretamente no processo ajustando a abertura de válvulas. Um outro exemplo é o Controle Avançado de Otimização da Produção que tem o objetivo de maximizar a produção considerando as restrições do processo baseado no conhecimento dos especialistas (operadores e engenheiros) para implementar uma otimização heurística.

3 MODELAGEM DO PROBLEMA DE ESCALONAMENTO DE BOMBAS

3.1 Formulação do problema

Segundo Montevenchi (2013), formular um problema para pesquisa consiste em identificar, definir e especificar as medidas dos componentes de um modelo de decisão. Nesta primeira fase do estudo, portanto, requer a definição do problema.

No problema de otimização do escalonamento de bombas, deseja-se a minimizar a variação de vazão causada pelo fato de ligar e desligar bombas nas estações coletoras. Uma forma de se conseguir isto é garantir um espaçamento mínimo entre acionamentos de bombas, então uma das ações do sistema para minimizar a variação da vazão total para a estação central é escalonar no tempo as bombas de exportação de modo a evitar que uma bomba em uma estação seja ligada ao mesmo tempo que outra em outra estação.

Tendo como referência a Figura 1.2. Para cada estação satélite n , o nível no tanque responde de acordo com a Equação (3.1), onde T é o tempo de amostragem (tempo entre índices k e $k+1$), $q_{i,n}^k$ é a vazão de entrada e $q_{o,n}^k$ é a vazão de saída no instante k . Ou seja, o nível do tanque no momento h_n^{k+1} será o nível atual (h_n^k), somado à variação de nível causado pelas vazões de entrada e saída:

$$h_n^{k+1} = h_n^k + \frac{T}{A_n} (q_{i,n}^k - q_{o,n}^k) \quad (3.1)$$

A vazão de saída, $q_{o,n}^k$, por outro lado, é o resultado dos comandos $u_{n,i}^k$ em k , que aciona a i 'essima bomba da estação satélite n , como mostrado na Equação (3.2), sob a hipótese de que todas as nb_n bombas de uma mesma estação n têm a mesma capacidade nominal Q_n . Ou seja, a soma das vazões das bombas ligadas no momento k dá a vazão de saída da estação n .

$$q_{o,n}^k = \sum_{i=1}^{nb_n} u_{n,i}^k \cdot Q_n, \quad u_{n,i}^k \in \{0,1\} \quad (3.2)$$

A equação dinâmica (3.1), para fins de predição, deve ser inicializada com o valor medido de h_n^0 . Também é necessário conhecer a vazão de entrada

$q_{i,n}^0$ (repetida no horizonte de predição $K \geq 0$), o que é difícil na maioria dos casos já que essa vazão é raramente medida ou raramente estimada na frequência requerida pelo problema devido ao grande número de poços envolvidos.

Com a intensão de diminuir a dependência do modelo com variáveis não medidas, aumentar a robustez, e diminuir o número de variáveis de decisão, é proposto um modelo incremental, baseado na variação do nível das estações:

$$\Delta h_n^{k+1} = h_n^{k+1} - h_n^k \quad (3.3)$$

e Considerando a hipótese de vazão constante de entrada durante o horizonte de predição, a variação de nível no momento $k+1$ será a variação ocorrida no momento k menos a variação de nível causada pela vazão de saída. A formulação resultante é a seguinte:

$$\Delta h_n^{k+1} = \Delta h_n^k - \frac{T}{A_n} \Delta q_{o,n}^k \quad (3.4)$$

onde $\Delta q_{o,n}^k$ são as variações nas vazões de saída, causadas pelo acionamento das bombas.

Conhecendo-se a variação de nível no momento $k+1$ (Δh_n^{k+1}) e o nível atual (h_n^k) chega-se a predição do nível em um momento futuro, com a seguinte formulação:

$$h_n^{k+1} = h_n^k + \Delta h_n^{k+1} \quad (3.5)$$

A fim de reduzir o tamanho do problema, limitou-se o acionamento de apenas uma bomba por estação por vez e decidir, apenas, se uma das bombas deve ser desligada ou ligada, sem definir qual. Assim, podemos formular uma equação para a variação de vazão de saída da estação n pressupondo que somente ocorrerá alguma alteração nesta variável se houver eventos de ligar ou desligar alguma de suas bombas.

Então teremos:

$$\Delta q_{o,n}^k = Q_n (u_n^{on,k} - u_n^{off,k}) \quad (3.6)$$

com

$$u_n^{on,k}, u_n^{off,k} \in \{0,1\} \quad (3.7)$$

$$u_n^{on,k} + u_n^{off,k} \leq 1 \quad (3.8)$$

onde $u_n^{on,k}$ e $u_n^{off,k}$ são as variáveis livres que, respectivamente, ligam ou desligam uma bomba no instante k . A bomba a ser efetivamente ligada ou

desligada não faz parte da formulação para reduzir as variáveis de decisão. Uma escolha poderia ser, por exemplo, priorizar ligar a bomba com menor horímetro e desligar a com maior. Observe que a Equação (3.6) soma à vazão de saída a vazão de uma bomba Q_n quando $u_n^{on,k} = 1$ e $u_n^{off,k} = 0$, ou reduz a vazão de uma bomba quando $u_n^{on,k} = 0$ e $u_n^{off,k} = 1$, ou mantém a vazão de saída quando $u_n^{on,k} = 0$ e $u_n^{off,k} = 0$.

As bombas podem ser ligadas até que todas as bombas estejam ligadas, ou desligadas até que não haja mais bombas a desligar. Essa condição é expressa na restrição (3.10), onde $u_n^{on,k}$ é o número de bombas ligadas por estação no instante k .

$$nb_n^{on,k} = nb_n^{on,k-1} + (u_n^{on,k} - u_n^{off,k}), \quad (3.9)$$

$$0 \leq nb_n^{on,k} \leq nb_n \quad (3.10)$$

O modelo definido acima depende apenas da medição dos níveis e do conhecimento do número de bombas ligadas nas estações. Esse modelo incremental do processo será utilizado na formulação do problema de otimização.

3.2 Construção do Modelo Matemático

Segundo Montevenchi (2013), um modelo deve especificar as expressões quantitativas para o objetivo e as restrições do problema em termos de suas variáveis de decisão. Existem vários tipos, sendo o modelo matemático o mais utilizado na Pesquisa Operacional. Sua linguagem é em forma de equações.

O objetivo é que a variação da vazão total das estações coletoras para a estação central seja a menor possível e não ultrapasse o especificado Δq_o^{\max} :

$$\min \sum_{k \in K^-} (\Delta q_o^k)^2 \quad (3.11)$$

$$\Delta q_o^k = \sum_{n \in K} \Delta q_{o,n}^k \quad (3.12)$$

$$\Delta q_o^{\min} \leq \Delta q_o^k \leq \Delta q_o^{\max} \quad (3.13)$$

Onde $K^- = \{0, \dots, k-1\}$.

O problema de otimização deve escalonar no tempo o acionamento das bombas de modo a manter os níveis dentro das faixas de controle e manter a variação da vazão total das estações coletoras no mínimo possível, dentro de limites desejáveis.

Este requisito para manter controlado os níveis das estações coletoras pode ser expresso como:

$$\min \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} (h_n^k - h_n^{ref,k})^2 \quad (3.14)$$

$$h_n^{ref,min} \leq h_n^{ref,k} \leq h_n^{ref,max} \quad (3.15)$$

$$h_n^{min} \leq h_n^k \leq h_n^{max} \quad (3.16)$$

onde se decide o escalonamento das bombas, implícito no cálculo de h_n^k , e os níveis de referência $h_n^{ref,k}$ de modo a minimizar a função objetivo (3.14). Aqui, $N = \{1, \dots, N\}$ é o conjunto de estações, $K = \{1, \dots, K\}$ é o horizonte de predição, e os níveis de controle e os limites físicos dos tanques são dados por $h_n^{ref,min}$ e $h_n^{ref,max}$ e por h_n^{min} e h_n^{max} , respectivamente.

Se for possível manter o nível das estações dentro da faixa de controle durante todo o horizonte de predição, então haverá um nível de referência que faça o objetivo ter o menor valor possível (igual a zero). É possível que o nível saia da faixa de controle, mas isso penaliza a função objetivo. A possibilidade de excussões de nível além da faixa de controle permite atrasar o acionamento das bombas e minimizar a variação da vazão de saída: quanto maior a faixa de controle, menor a frequência de acionamento das bombas.

Existem restrições fortes em (3.13) e (3.16) que podem ser incompatíveis entre si, pois a minimizando a vazão podemos ter descontrole dos níveis e vice-versa. Para evitar infactibilidades, o problema de otimização completo incorpora uma variável de folga que altera a restrição (3.16):

$$P_{escalamento} : \min \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} (h_n^k - h_n^{ref,k})^2 + \beta \sum_{k \in K^-} (\Delta q_o^k)^2 + \alpha \sum_{k \in K^-} (s^k)^2 + \gamma \sum_{n \in N^-} v_n^2 \quad (3.17)$$

Sujeito a $n \in N, k \in K^-$:

$$\begin{cases} \Delta h_n^{k+1} = \Delta h_n^k - \frac{T}{A_n} \Delta q_o^k + \delta_{k,0} v_n, \\ h_n^{k+1} = h_n^k + \Delta h_n^{k+1} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} \Delta q_{o,n}^k = Q_n(u_n^{on,k} - u_n^{off,k}), \\ u_n^{on,k}, u_n^{off,k} \in \{0,1\}, \\ u_n^{on,k} + u_n^{off,k} \leq 1, \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\begin{cases} nb_n^{on,k} = nb_n^{on,k-1} + (u_n^{on,k} - u_n^{off,k}), \\ 0 \leq nb_n^{on,k} \leq nb_n \end{cases} \quad (3.19)$$

para $n \in N, k \in K$:

$$\begin{cases} h_n^{ref,min} \leq h_n^{ref,k} \leq h_n^{ref,max} \\ h_n^{min} \leq h_n^k \leq h_n^{max} \end{cases} \quad (3.21)$$

para $k \in K^-$:

$$\begin{cases} \Delta q_o^k = \sum_{n \in N} \Delta q_{o,n}^k \\ -\Delta q_o^{max} \leq \Delta q_o^k + s^k \leq \Delta q_o^{max} \end{cases} \quad (3.22)$$

onde $\delta_{k,0}$ é o delta de Kronecker (tem valor 1 somente quando $k = 0$, e valor 0 em $k \neq 0$). A solução do problema são os comandos $u_n^{on,k}$ e $u_n^{off,k}$, os níveis de referência $h_n^{ref,k}$ e as variáveis de folga s^k e v_n , para todas as estações e todo o horizonte de controle, que minimize a função custo. Os parâmetros positivos α , β e γ ajustam a importância dos termos que compõem o objetivo final.

A variável de folga s^k permite uma variação maior que o especificado na vazão total de saída quando isso é necessário para manter o nível dentro dos limites físicos, a custo de uma penalização na função objetivo. Já a variável de folga v_n foi acrescentada para filtrar ruídos na medição de nível. Quando um ruído fizer a variação de nível excessiva a ponto de impedir o atendimento da restrição (3.22), então a variável de folga modificará a medição Δh_n^0 para evitar a infactibilidade.

3.2.1. Implementação em GAMS

Esse é um problema de Programação Quadrática Inteira Mista do inglês *Mixed Integer Quadratic Program* (MIQP), e é resolvido eficientemente pelo solver CPLEX. A função objetivo (3.17) foi representada da seguinte forma: *objective..*

$$\begin{aligned}
z = e = & \text{sum}(sn_on, \text{sum}(shy, \text{power}((h(sn_on, shy) \\
& - href(sn_on, shy)), 2))) + \alpha * \text{sum}(shu, \text{power}(s1(shu), 2)) \\
& + \beta * \text{sum}(sn_on, \text{sum}(shu, \text{power}(dgo(sn_on, shu), 2))) \\
& + \gamma * \text{sum}(sn_on, \text{power}(s2(sn_on), 2));
\end{aligned}$$

O código GAMS está transcrito no Apêndice1.

3.3 Regras de inferência no MPA

Conforme explanado no item 2.4, as estações coletoras já possuem um sistema de automação, capacitado de sensores de níveis, vazões, pressões e *status* de bombas. Visando o gerenciamento central do processo de transferência de petróleo, foi implementado um modo de controle complementar, para vazões e níveis, fazendo com que estas variáveis sejam manipuladas dentro dos limites das lógicas de cada estação. Paralelamente as em cada PLC há um sistema monitorando para que os limites físicos da instalação sejam respeitados, sendo esta redundância a garantia de que cada estação possa continuar operando, mesmo que haja falhas de comunicação com o servidor do MPA.

Conforme explicado no item 2.4.1, o MPA é uma linguagem de programação gráfica. As regras de inferência foram implementadas em forma de fluxogramas, contidos nos Apêndices, sendo explicados a seguir:

3.3.1. Fluxos para Executar otimizador GAMS

O fluxo “Gams atualiza cond”, contido no Apêndice3, faz a leitura dos valores do campo e prepara os dados recebido do sistema supervisorio para serem enviados para o otimizador GAMS. No fluxo “Gams Executa”, executa o otimizador e aplica os resultados na planta. O GAMS sugere qual estação deve ter a bomba ligada ou desligada.

O otimizador considera a variação dos níveis pelo cálculo da derivada e considera a condição em que um nível já está caindo, não deve-se ligar mais

uma bomba, igualmente para a condição em que um nível esteja subindo, não deve-se desligar mais bombas. Mas pode haver casos em que a solução ótima envolva alguma operação nestas condições. Para isto é aplicado uma verificação redundante ao otimizador, aumentando a robustez da decisão.

No fluxo "Gams Executa", contido no Apêndice4, antes de ligar uma bomba é comparado o nível atual (h_n^k) com LB ($(LSH_{AUX} + 2 * LSL_{AUX})/3$), não sendo permitido ligar bomba abaixo deste parâmetro (LB) e antes de desligar uma bomba, o nível é comparado com LA ($(2 * LSH_{AUX} + LSL_{AUX})/3$), não sendo permitido desligar bomba acima deste parâmetro (LA). Na Figura 3.1 é ilustrado este caso considerando $LSH_{AUX} = 3m$ e $LSL_{AUX} = 2m$, sendo assim $LA = 2,66m$ e $LB = 2,33m$.

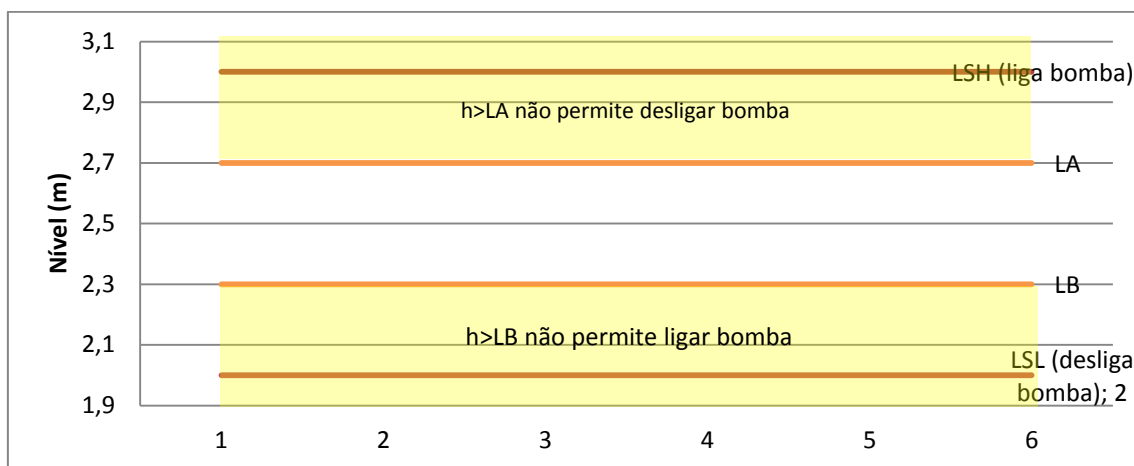


Figura 3.1 Faixas de controle de nível

Ou seja, para aumentar a robustez da decisão, o sistema MPA implementa as seguintes regras:

Regra 1: se nível alto, então não é permitido desligar bomba;

se nível baixo, então não é permitido ligar bomba;

Regra 2: se saída do controlador < 90%, então não é permitido ligar bomba (aguardar);

se saída do controlador > 60%, então não é permitido desligar bomba (aguardar);

A Regra 1 estabelece que não é razoável ligar uma bomba quando o nível está baixo, bem como não é razoável desligar uma bomba quando o nível estiver alto. O esperado é fazer exatamente o contrário. O nível baixo foi

definido abaixo da faixa de controle de sintonia mais branda e o nível alto foi definido acima da faixa de controle de sintonia mais branda. Já a regra 2 estabelece que o otimizador deve esperar que os recursos de controle se esgotem para que seja possível acrescentar ou retirar bruscamente uma bomba.

Essas regras, definidas fora do otimizador representam uma fonte de subotimalidade. O ideal é incorporá-las no próprio otimizador para que ele tome a decisão ótima considerando as restrições que essas regras apresentam. Essas regras deverão ser incorporadas no otimizador em uma próxima versão. Também os limites das regras deverão ser avaliadas no teste em operação.

3.3.2. Fluxo para Ajuste sintonia PID Bombas com Variador

Antes de ligar ou desligar uma bomba o sistema primeiro tenta ajustar as vazões das bombas com inversores. Para isto foram definidos faixas de níveis para sintonias agressivas e amenas dos PIDs. Foram inseridos os *setpoints* LSH_{AUX} para ligar próxima bomba e o LSL_{AUX} . O gráfico na Figura 3.2 ilustra as faixas de controle de nível. Caso o nível esteja na faixa ilustrada em verde, o MPA irá ajustar o PID para uma sintonia amena. Esta faixa de nível (h_n^k) foi fixada em $LSH_{AUX} - 0,2 \leq h_n^k \leq LSL_{AUX} + 0,2$. Para evitar instabilidade nas mudanças entre as faixas foi criado uma faixa de histerese em que é permitida tanto a sintonia agressiva, como a amena, sendo mantida a sintonia anterior ao momento de entrada nesta faixa. Esta faixa foi fixada em $LSH_{sint} - 0,1$ e $LSL_{sint} + 0,1$.

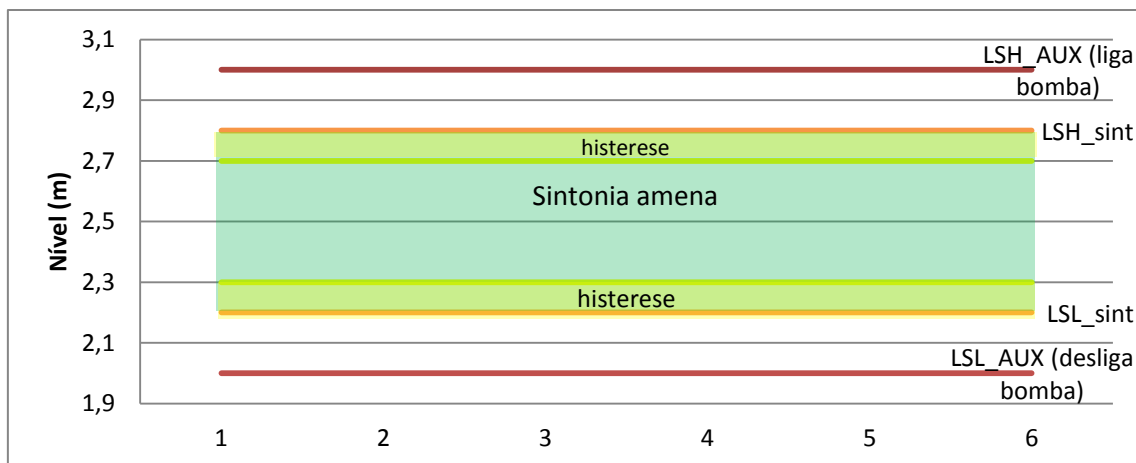


Figura 3.2 Faixas de Sintonia

O diagrama implementado no MPA está detalhado no Apêndice5 “Ajuste sintonia PID Bombas com Variador”.

3.3.3. Fluxos de comando para Ligar/desligar bomba da EC

A heurística para ligar e desligar bomba, visa manter as bombas com variadores de frequência ligadas. Isto é necessário, pois estas bombas são estratégicas na estabilização da vazão de saída de cada estação, evitando a oscilação. A decisão de ligar ou desligar uma bomba é implementada pelo MPA da seguinte forma:

- 1- O MPA escolhe a bomba com as seguintes prioridades,
 - a) - prioriza ligar as bombas com variador de velocidade;
 - prioriza desligar as bombas de velocidade fixa;
 - b) em seguida, seleciona a bomba com menor horímetro para ligar e com maior para desligar.
- 2- O MPA aciona o comando de ligar ou desligar a bomba escolhida.

Os diagramas implementados no MPA estão detalhados no Apêndice6 “Ligar bomba da EC” e Apêndice7 “Desligar bomba da EC”.

4 RESULTADOS

4.1 Teste do Modelo e avaliação da Solução obtida

Montevenchi (2013), diz que para julgar a validade de um modelo, é necessário a verificação de que se ele prediz ou não os efeitos relativos das linhas de ação alternativas, com suficiente precisão, de maneira a permitir uma satisfatória decisão.

Para uma primeira análise do modelo, ilustra-se o funcionamento do otimizador, considerando um sistema de produção com $N = 3$ estações coletoras caracterizadas pelos parâmetros dados na Tabela 1.

Tabela 1: Sistema de Produção Ilustrativo

Estação	Altura do tanque	A_n	$q_{i,n}^k$	nb_n	Q_n	$h_n^{ref,min}$	$h_n^{ref,max}$	h_n^{min}	h_n^{max}
1	6,2m	79,38m ²	112,5m ³ /h	3	45m ³ /h	2,79m	3,55m	0,62m	5,58m
2	9,6m	176,5m ²	158m ³ /h	5	65m ³ /h	4,32m	5,28m	0,96m	8,64m
3	9,6m	176,5m ²	230m ³ /h	5	120m ³ /h	4,32m	5,28	0,96m	8,64m

As condições iniciais são dadas na Tabela 2:

Tabela 2: Condições Iniciais

Estação	h_n^0	Δh_n^0	$nb_n^{on,k-1}$
1	3m	0,141723m	1
2	4m	0,087819m	1
3	4m	0,103872m	1

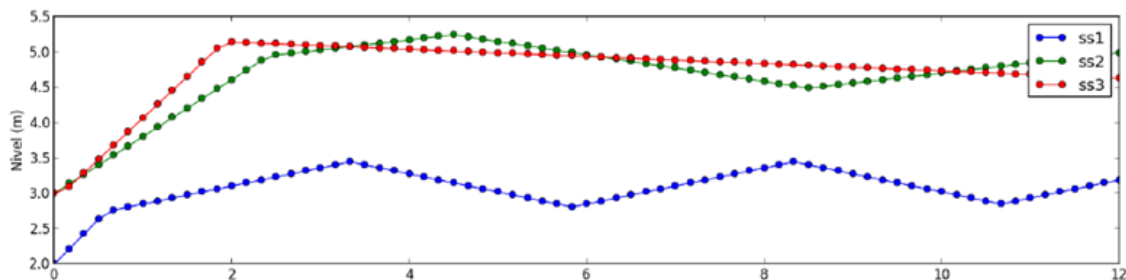
Os parâmetros do problema na Tabela 3, com tempo de amostragem igual a $T = 10$ minutos e horizonte de predição igual a $K = 24$ (4 h).

Tabela 3: Parâmetros

T	K	α	β	γ	Δq_0^{max}
10mim	24	5	0.00001	100	125m ³ /h

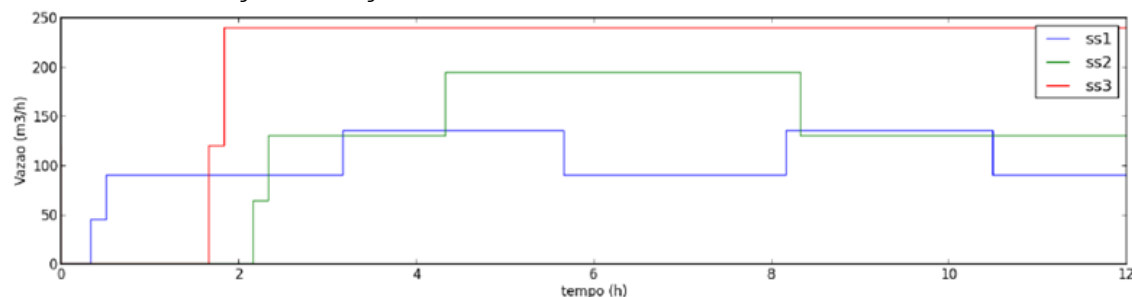
Nos Gráficos 4.1 e 4.2, pode-se observar a atuação do modelo simulado em doze horas de operação. O otimizador evitou a partida e parada de bombas com intervalos menores que 10 minutos e manteve os níveis dentro da faixa de controle. Para a configuração dada, essa é a melhor das soluções.

Gráfico 4.1 Simulação: Variação de níveis



No Gráfico 4.1 observa-se a variação dos níveis das estações dentro da faixa de controle na resposta ótima.

Gráfico 4.2 Simulação: Variação de vazão



No Gráfico 4.2 temos as vazões das estações, que é percebido o acionamento das bombas nestas variações. Pode-se observar, por exemplo, no comportamento das ss2, na oitava hora, houve o desligamento de uma bomba, embora o nível ainda estivesse próximo do *setpoint*. Esta ação ocorreu para minimizar a vazão, necessária devido a partida de uma bomba na ss1.

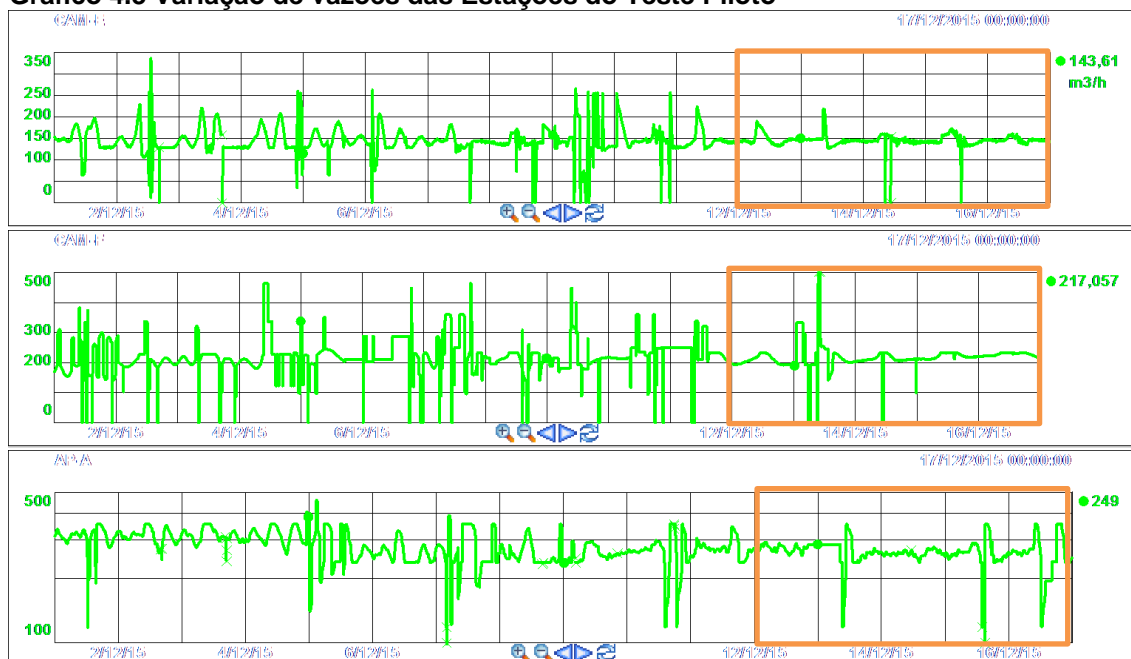
Os resultados do Modelo apresentado podem ser avaliados na prática quando aplicado em um Sistema Especialista.

4.2 Teste de Implantação parcial

O sistema foi colocado em operação piloto no dia 11/12/2015 com apenas três estações habilitadas. Os gráficos de vazão das três estações

(Gráfico 4.3) mostram uma mudança de padrão nos cinco dias de operação (regiões destacadas). Ao analisar o comportamento no momento anterior (fora das regiões destacadas), observamos tanto grandes oscilações, como uma frequência elevada entre os picos e vales.

Gráfico 4.3 Variação de vazões das Estações do Teste Piloto



Já o comportamento das vazões durante o teste do sistema (regiões destacadas do gráfico 4.3), observa-se as oscilações menores, com frequências mais estáveis.

Houve uma mudança também no padrão dos níveis dos tanques que se mostraram estarem menos oscilatórios durante o teste do sistema (regiões destacadas do gráfico 4.4). Embora as restrições do otimizador estejam apenas com o objetivo de respeitar os níveis máximos e mínimos de cada tanque, observa-se que a estabilidade na vazão de saída, acarreta em variações menores nos níveis e conseqüentemente tornando o nível estável.

Gráfico 4.4 Variação de níveis das Estações do Teste Piloto

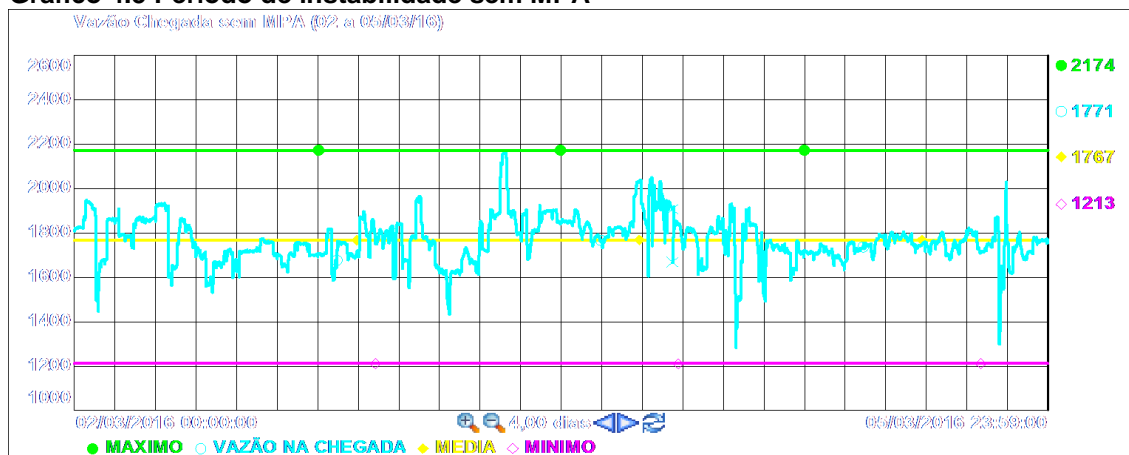


O primeiro teste do sistema se mostrou positivo no quesito do controle individual das estações, de modo que o próximo passo será estender a aplicação para as demais estações para avaliação do otimizador com um número maior de variáveis.

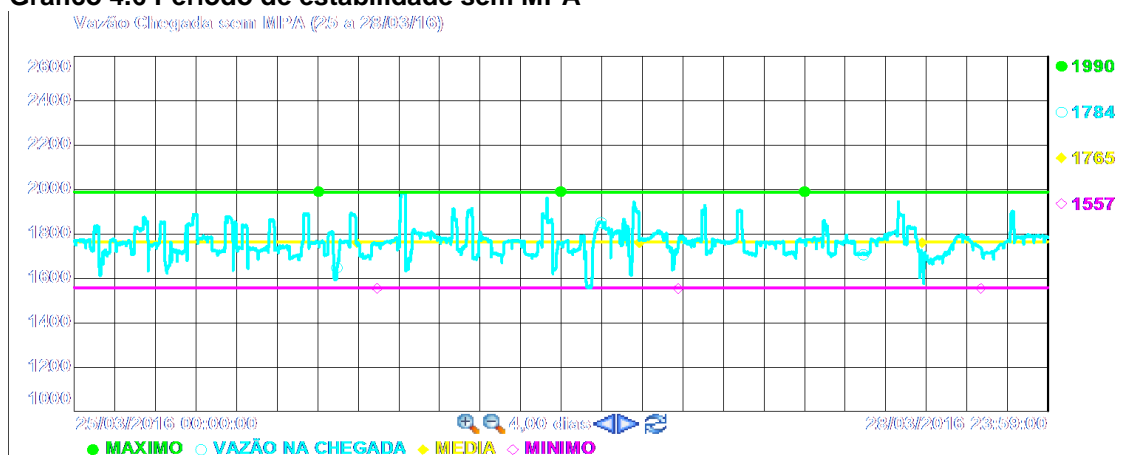
4.3 Implantação do Sistema

Para analisar o comportamento do sistema comparam-se períodos de tempo em que a rede de escoamento operava de forma descentralizada com os períodos após a implantação do otimizador.

No Gráfico 4.5 observa-se um período de pré-implantação do sistema que pode-se considerar como instável. No geral as vazões variam de 1.600 a 1900m³/h, mas observa-se picos e vales no gráfico, ficando o valor máximo do período em 2.174m³/h e o mínimo em 1.212m³/h. Apresenta-se este gráfico para mostrar um comportamento instável, mas não será comparado o MPA com ele.

Gráfico 4.5 Período de instabilidade sem MPA

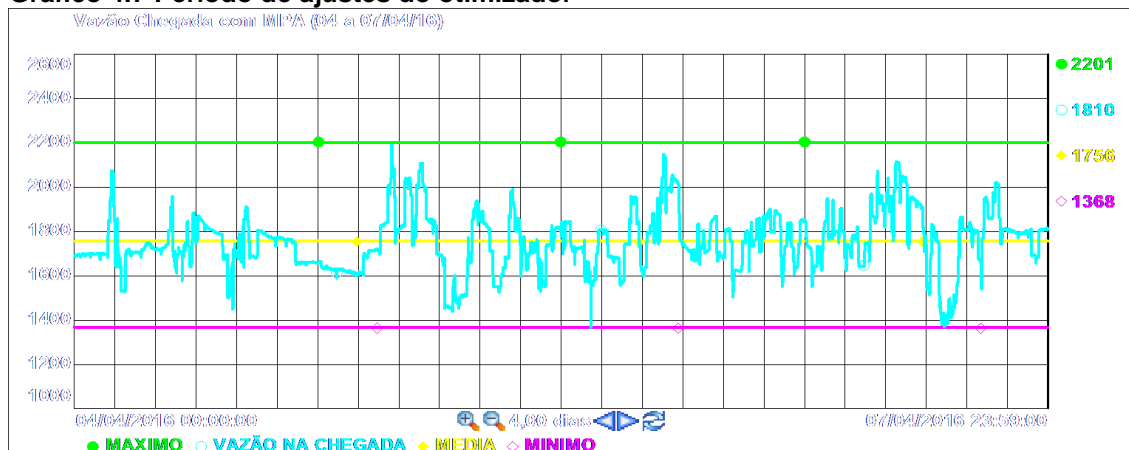
No Gráfico 4.6, foi selecionado um dos melhores períodos que podemos citar como estável, mesmo sendo operado de forma descentralizada. No geral as vazões variam de 1.600 a 1900m³h, e os picos e vales no gráfico ficam próximo a esta faixa de vazão. Mas devido ao sistema ser dinâmico seria necessário uma constante modificação dos parâmetros dos controladores para conseguir este desempenho constantemente, de modo que o comportamento predominante é o observado no Gráfico 4.6.

Gráfico 4.6 Período de estabilidade sem MPA

No Gráfico 4.7 observa-se a vazão do período em que o otimizador foi implantado e que estava em fases de ajustes. O principal desafio encontrado foi a lentidão na comunicação da estação central com as demais estações. Este problema foi agravado quando o otimizador tinha uma solução para determinada estação e a comunicação ficava quase que dedicada para esta,

deixando as demais com atraso na informação. Isto fazia com que os valores apresentados para o otimizador gerassem soluções equivocadas.

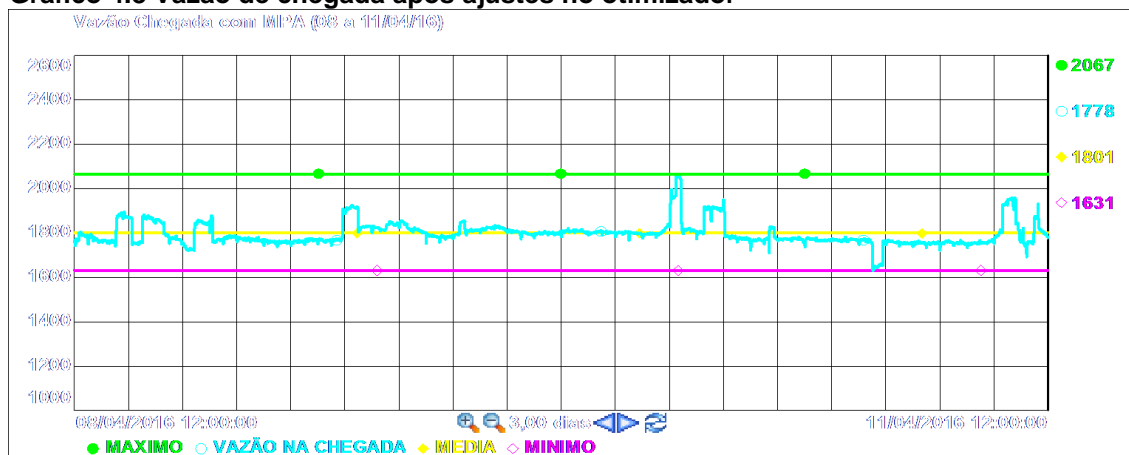
Gráfico 4.7 Período de ajustes do otimizador



Por exemplo, houve um atraso na comunicação do supervisor com uma estação superior aos 10 minutos um pouco antes e com isso o valor de nível se manteve igual, calculando Δh igual a 0. Porém, nesse momento, ainda não houve qualquer solicitação por parte do GAMS. Somente nos seguintes 10 minutos, a comunicação passou por novamente pela estação e foi informado um novo valor para o nível, mas o Δh ainda era baixo. Então, nesse segundo momento, o GAMS solicitou que a bomba fosse ligada. Em paralelo, o MPA também ajustou a sintonia do PID para a sintonia agressiva.

Após a constatação destes problemas, foram realizadas alterações no MPA para tentar reduzir a demanda de comunicação e a princípio a situação melhorou. No Gráfico 4.8 temos o resultado após os ajustes. É observado que não há vales e os picos de vazão foram minimizados para bem próximo à média de vazão.

Gráfico 4.8 Vazão de chegada após ajustes no otimizador



Para alcançar este resultado foram necessários ajustes nas variáveis de folga do otimizador e nos parâmetros positivos α , β e γ ajustam a importância dos termos que compõem o objetivo final, além de aumento nas variações de níveis de trabalho de algumas estações, permitindo que houvesse melhores soluções para o otimizador.

Comparando os resultado com a metodologia adotada anteriormente, observa-se, conforme os gráficos 4.3 e 4.4, que ao analisar o comportamento individual das estações, obteve-se avanços, com a estabilidade do processo, tanto nas vazões como nos níveis. A análise dos gráficos 4.5, 4.6 e 4.8 indica que ao aplicar o otimizador no controle da malha de escoamento obteve-se a minimização do somatório das vazões, garantindo a estabilidade e alcançando o objetivo do projeto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou a otimização de um sistema de operação e monitoramento em tempo real, aplicados ao sistema supervisor da operação de rede de escoamento de petróleo na Petrobras, combinando as técnicas de otimização por Programação Quadrática Inteira Mista juntamente com as regras implementadas no MPA

A metodologia apresentada neste trabalho mostrou-se adequada para a presente aplicação, tanto na modelagem do problema, como nas soluções apresentadas pelo otimizador. As restrições para o controle dos níveis e variações de vazão foram consideradas. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios para o problema tratado, pois conseguiu-se o objetivo principal que era a minimização da vazão de chegada na estação destino.

O MPA se mostrou uma ferramenta versátil para interagir com um sistema de automação real, abrindo uma porta para trabalhos futuros. Uma possibilidade é implementar as soluções propostas através de algoritmos genéticos por Brasileiro (2005), Santana (2006) e Machado (2006), ou ainda a solução proposta por Borges (2013) através de lógica fuzzy.

Outras análises sobre o sistema implementado também abrem margem para trabalhos futuros em outras áreas, como a análise econômica sobre os custos de energia e sobrevida de equipamentos, além de análise dos benefícios hidráulicos, como a aumento da capacidade de escoamento e a redução de pressão na malha de dutos.

Referências

- AURELIO. (2000) Miniaurélio Século XXI: Ominidicionário da língua portuguesa. Nova Fronteira.
- ARENALES, R. M et al. (2007). *Pesquisa Operacional*. [S.l.]: Elsevier.
- AXEHILL, D. (2008). *Integer Quadratic Programming for Control and Communication*. (Dissertations), Linköping studies in science and technology.
- BARRA, C. A. (2008). *Otimização do Processo de Distribuição de Locomotivas*. (Graduação em Engenharia da Produção), Universidade Federal de Juiz de Fora.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. (2012). *Pesquisa operacional para cursos de administração*. Elsevier.
- BORGES, R. E. P. (2013). *Sistema Inteligente para Apoio à Decisão na Operação de uma Malha de Escoamento de Petróleo*. (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo), Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- BRASILEIRO, E. V. (2005). *Um algoritmo genético para otimização do controle de redes de escoamento de petróleo*. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Universidade Federal de Campina Grande.
- CAMPOS, Mario Massa de, SAITO, Kaku, *Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos*, Ed. Ciência Moderna, 2004.
- DUARTE, Fábio Gil Martins; CHIESSE, Alcio Rodrigues; BORGES FILHO, Álvaro de Miranda; SANTOS, Cláudio Antonio dos. *Curso de CLP e Automação Industrial para Operadores*. Universidade Petrobras. Rio de Janeiro.
- FAGUNDES, Minéia Cappellari (2014). *Otimização Combinatória para Alocação de Fontes Renováveis em Microrredes de Corrente Contínua*.

Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista.

FALLER, Anderson Carlos (2009). Desenvolvimento de uma Plataforma para Otimização da Produção em Tempo Real em Campos de Petróleo Operados por Gas-Lift. Dissertação (Graduação em Engenharia de Controle e Automação Industrial). Universidade Federal De Santa Catarina.

FICHMAN, Sérgio; SOUZA, Ricardo dos Santos Alves de (2015). *Noções de Automação e Controle*. Universidade Petrobras. Rio de Janeiro.

LACHTERMACHER, Gerson (1956). *Pesquisa operacional na tomada de decisões : modelagem em Excel / Gerson Lachtermacher*. - Rio de Janeiro : Elsevier, 2007 - 4- Reimpressão

LISBOA, E. F. A (2002). Pesquisa Operacional. Apostila do Curso. Versão digital disponível na internet em <http://www.ericolisboa.eng.br>

LOBATO, D. L. (2009). *Algoritmos para problemas de programação não-linear com variáveis inteiras e contínuas*. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo.

LUGER, G. F. (2014). Inteligência Artificial (6 ed) – São Paulo. Pearson.

MACHADO, É. C. (2006). *Operação de redes de escoamento de petróleo utilizando algoritmo genético multi-objetivo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande.

MENCO, Carlos Lázaro (2013). *Método de Programação Linear Inteira*. Universidade Federal de Santa Maria. <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgV2IAF/metodo-programacao-linear-inteira#>

- MONTEVECHI, José Arnaldo Barra (2013). Pesquisa operacional. Universidade Federal de Itajubá. Instituto de Engenharia de Produção e Gestão
- TECGRAF, PUC-Rio (2015). *MPA - Módulo de Procedimentos Automatizados*. (Manual do Sistema)
- TECGRAF, PUC-Rio (2016). *MPA - Desenvolvimento e Execução de Aplicações de Controle e Automação de Processos Industriais* (disponível em: <http://www.tecgraf.puc-rio.br/pt/software/sw-mpa.html>).
- PINHEIRO, D. H. (2013). *Desenvolvimento de um Modelo de Otimização de Consumo de Combustível para o problema de Roteamento de Veículos Capacitados*. Dissertação (Graduação em Ciência da Computação), Universidade Federal de Lavras.
- RIBEIRO, M. A. (2005). *Controle de Processo Fundamentos & Aplicações*. (9ª ed.). Salvador: Tek.
- RIBEIRO, M. A. (2010). *Automação das Instalações de Produção de Petróleo* (6ª ed.). Salvador: Tek.
- SANTANA, C. W. (2006). *Calibração de um modelo de redes de escoamento de petróleo baseada no monitoramento em tempo real*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande.
- SECCHI, A. R. (2015). *Otimização de Processos*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Química. <http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ897/Otimiza.pdf>
- SILVA, A. C. (1999). *Otimização do transporte em oleodutos utilizando algoritmos genéticos e programação linear*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas.

- SILVA, A. F. da. (2010) *Pesquisa Operacional: Desenvolvimento e Otimização de Modelos Matemáticos por meio da Linguagem Gams*. Universidade Estadual Paulista.
- SILVA, A. F. da. (2013) *Pesquisa Operacional: Desenvolvimento e Otimização de Modelos Matemáticos por meio da Linguagem Gams*. Universidade Estadual Paulista.
- VILLELA, P. Ferraz (2008). *Um Algoritmo Exato para a Otimização de Carteiras de Investimento com Restrições de Cardinalidade*. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada). Universidade Estadual de Campinas.

APÊNDICES

APÊNDICE1: Código do otimizador GAMS (arquivo: **cam_escalamento_bombas.gms**)

**** Versão de 01/04/2016 - C ****

***** parâmetros do problema *****

Sets

sh equivalente a 0 a K - indice geral /1*13/
 shu(sh) equivalente a 0 a K-1 - indice das ações de controle /1*12/
 shy(sh) equivalente a 1 a K - indice das variáveis controladas /2*13/;

* sn: conjunto de estações (indefinido)

* inicialmente, estão todas excluídas

alias (sn,*);

set sn_on(sn);

sn_on(sn)=no;

Parameter hrefmin(sn) limite minimo da faixa desejável de nível,
 hrefmax(sn) limite máximo da faixa desejável de nível,
 hmin(sn) limite mínimo do nível,
 hmax(sn) limite máximo do nível,
 Qn(sn) vazão nominal,
 Ai(sn) área dos tanques,
 LA(sn) nível alto abaixo do qual é permitido desligar bombas,
 LB(sn) nível baixo acima do qual é permitido ligar bombas,
 nb(sn) total de bombas;

*leitura em arquivo de texto

\$include configuracoes.txt

***** entrada das condições iniciais *****

Parameter hinit(sn) nível inicial,
 dhinit(sn) variação inicial,
 npinit(sn) número inicial de bombas ligadas;

*leitura em um arquivo de texto

\$include cond-inicial.txt

*display hrefmax, LA, LB, hrefmin;

Parameter firststep(sh);
 firststep(sh)=yes\$(ord(sh) le 1);
Parameter firststepp(sh);
 firststepp(sh) = yes\$(ord(sh) ge 2);

Scalar

dqomin /-225/
 dqomax /225/
 alpha /5/
 beta /0.00002/

gamma /100/
 delta /10/
 T /0.16667/;

Binary variables uoff, uon;
Variables dqo, ddqo, href, s1, dh, z;
Variable s2, su;
Positive Variables qo, h;
integer variables np_on, snp_on;

Equations objective, edh(sn,sh), eh(sn,sh),
 p_on(sn,sh),
 c1(sn, shu), c2(sn, shu), c3(sn, sh),
 c4(sn, sh), c5(shu), c6(shu), c7(shu),
 c9(sn,shy), c10(sn,shy), c11(sn,shy),
 c12(sn,shu), c13(sn,shu),
 c14(shu), c15(shu);

edh(sn_on,sh).. dh(sn_on,sh) =e= dh(sn_on,sh-1) - dqo(sn_on,sh-1)*T/Ai(sn_on) + dhinit(sn_on)\$firststep(sh) + s2(sn_on)\$firststep(sh);

eh(sn_on,sh).. h(sn_on, sh) =e= h(sn_on,sh-1) + dh(sn_on,sh)\$firststepp(sh) + hinit(sn_on)\$firststep(sh);

p_on(sn_on,sh).. np_on(sn_on,sh) =e= npinit(sn_on)\$firststep(sh) + np_on(sn_on,sh-1) + (uon(sn_on,sh-1) - uoff(sn_on,sh-1));

c1(sn_on,shu).. uoff(sn_on,shu) + uon(sn_on,shu) =l= 1;

c2(sn_on,shu).. dqo(sn_on,shu) =e= Qn(sn_on) * (uon(sn_on,shu) - uoff(sn_on,shu));

c3(sn_on,sh).. href(sn_on,sh) =g= hrefmin(sn_on) ;

c4(sn_on,sh).. href(sn_on,sh) =l= hrefmax(sn_on) ;

c5(shu).. ddqo(shu) =e= sum(sn_on, dqo(sn_on, shu));

c6(shu).. ddqo(shu) + s1(shu) =l= dqomax;

c7(shu).. ddqo(shu) + s1(shu) =g= dqomin;

c9(sn_on,shy).. h(sn_on,shy) =g= hmin(sn_on) + 0.2 ;

c10(sn_on,shy).. h(sn_on,shy) =l= hmax(sn_on) ;

c11(sn_on,shy).. np_on(sn_on,shy) =l= nb(sn_on);

c12(sn_on,shu).. h(sn_on,shu) =g= LB(sn_on) * uon(sn_on,shu);

c13(sn_on,shu).. h(sn_on,shu) =l= LA(sn_on) + hmax(sn_on)*(1 - uoff(sn_on,shu));

c14(shu).. snp_on(shu) =e= sum(sn_on, uon(sn_on,shu) + uoff(sn_on,shu));

c15(shu).. snp_on(shu) =l= 3 + su(shu);

objective.. z=e= sum(sn_on,sum(shy, power((h(sn_on,shy)- href(sn_on,shy)),2)))+ alpha*sum(shu, power(s1(shu),2))+ beta*sum(sn_on,sum(shu, power(dqo(sn_on,shu),2))) + gamma*sum(sn_on, power(s2(sn_on),2)) + delta*sum(shu,power(su(shu),2));

```

model pb_escalonamento_bombas_incremental /all;

pb_escalonamento_bombas_incremental.OptFile =1;

option MIQCP = Cplex;

$onecho > Cplex.opt
varsel 3
epgap 0.1
*cuts -1
*qtolin 1
*nodesel 0
tilim 500
*optcr 0.8
$offecho

solve pb_escalonamento_bombas_incremental using MIQCP minimizing z;

***** arquivo de soluções e previsões *****

* salvar a solução e as previsões em txt
* a) previsões

file results /resultado.txt/;
put results;
put "objetivo(GAMS,1) = ",z.l:0/;

if (pb_escalonamento_bombas_incremental.Solvestat = 1,
    put "sucesso(GAMS,1) = ", "1":0/;
else
    put "sucesso(GAMS,1) = ", "0":0/);

put "estado(GAMS,1) = ",
    pb_escalonamento_bombas_incremental.Modelstat:0/;

put "Folgas"/;
loop(shu,
    put 's1(GAMS,'shu.tl:0 ') = ' s1.l(shu):0 /
);

loop(sn_on,
    put 's2('sn_on.tl:0',1) = ' s2.l(sn_on):0 /
);

put "Níveis"/;
loop((sn_on,shy),
    put 'h('sn_on.tl:0','shy.tl:0 ') = ' h.l(sn_on,shy):0 /
);

```

```

put "Delta Levels"/;
loop((sn_on,shy),
    put 'dh('sn_on.tl:0','shy.tl:0 ') = ' dh.l(sn_on,shy):0 /
);
put "Pump on command"/;
loop((sn_on,shu),
    put 'uon('sn_on.tl:0','shu.tl:0 ') = ' uon.l(sn_on,shu):0 /
);
put "Pump off command"/;
loop((sn_on,shu),
    put 'uoff('sn_on.tl:0','shu.tl:0 ') = ' uoff.l(sn_on,shu):0 /
);
putclose;

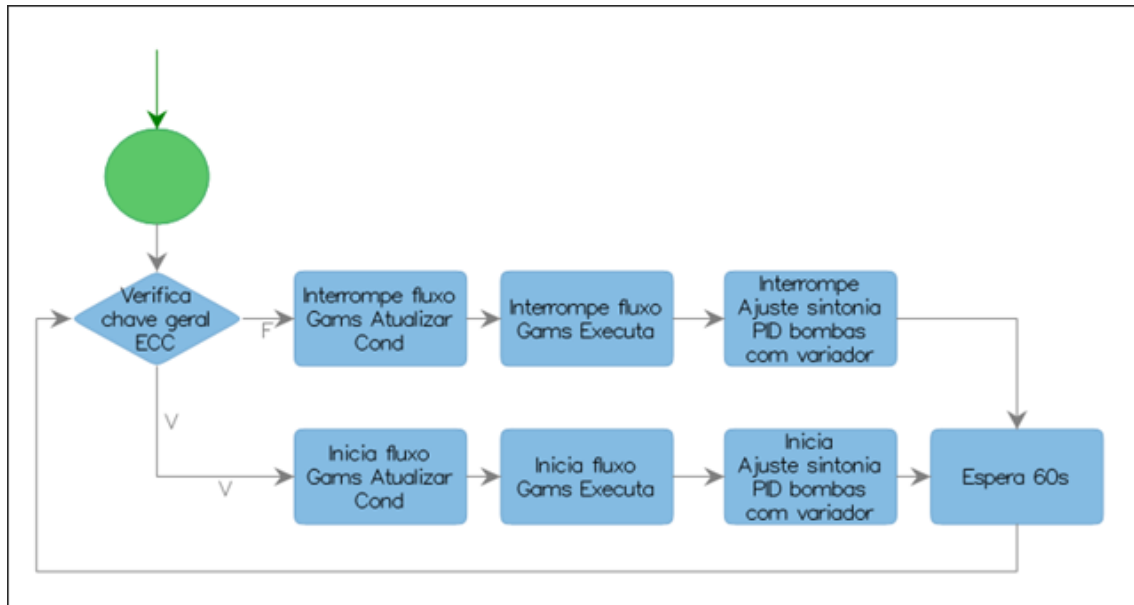
```

* b) solução

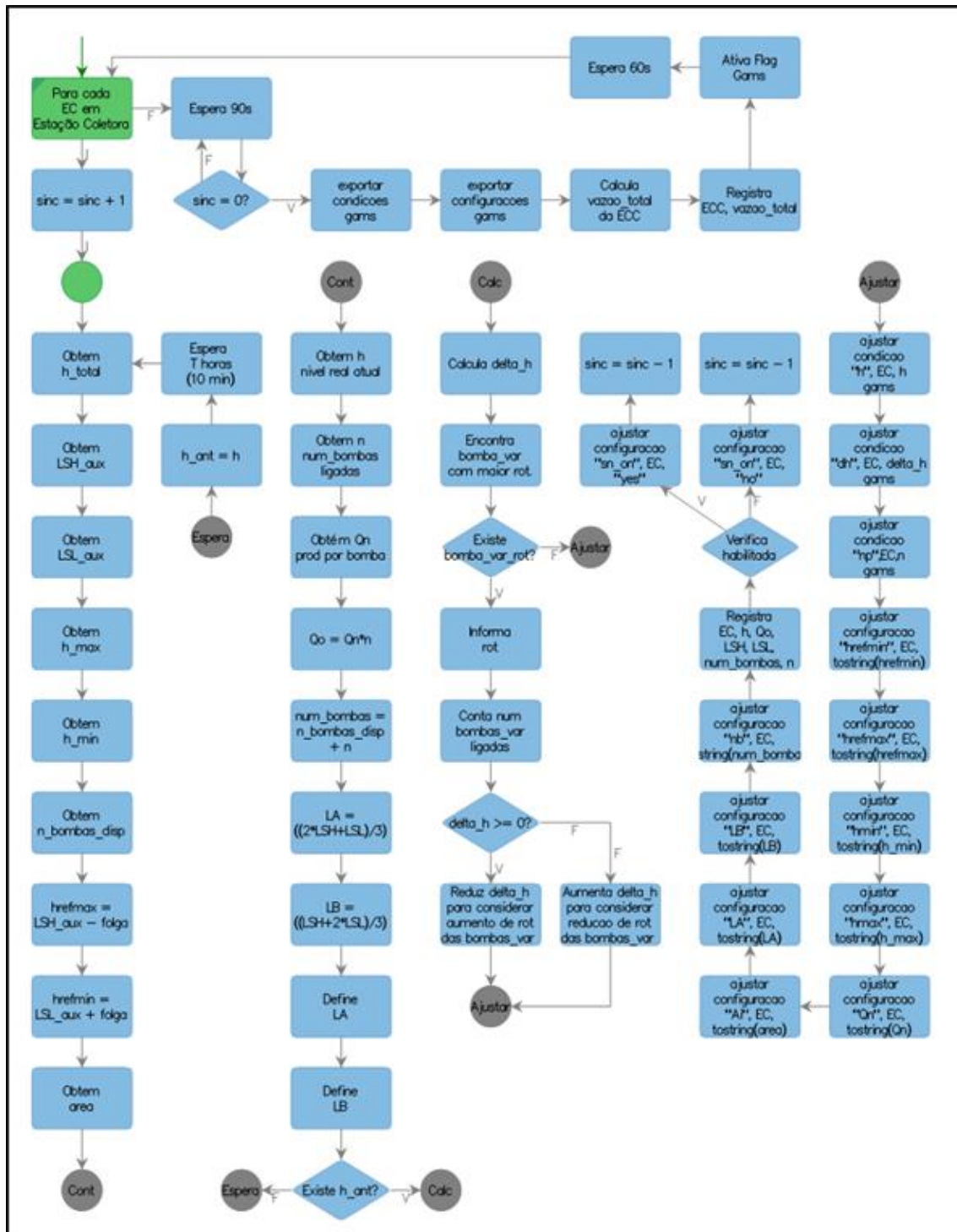
```

file solution /solucao.txt/;
put solution
loop(sn_on,
    put 'uon('sn_on.tl:0') = ' uon.l(sn_on,'1'):0 /
);
loop(sn_on,
    put 'uoff('sn_on.tl:0') = ' uoff.l(sn_on,'1'):0 /
);
putclose;
*****

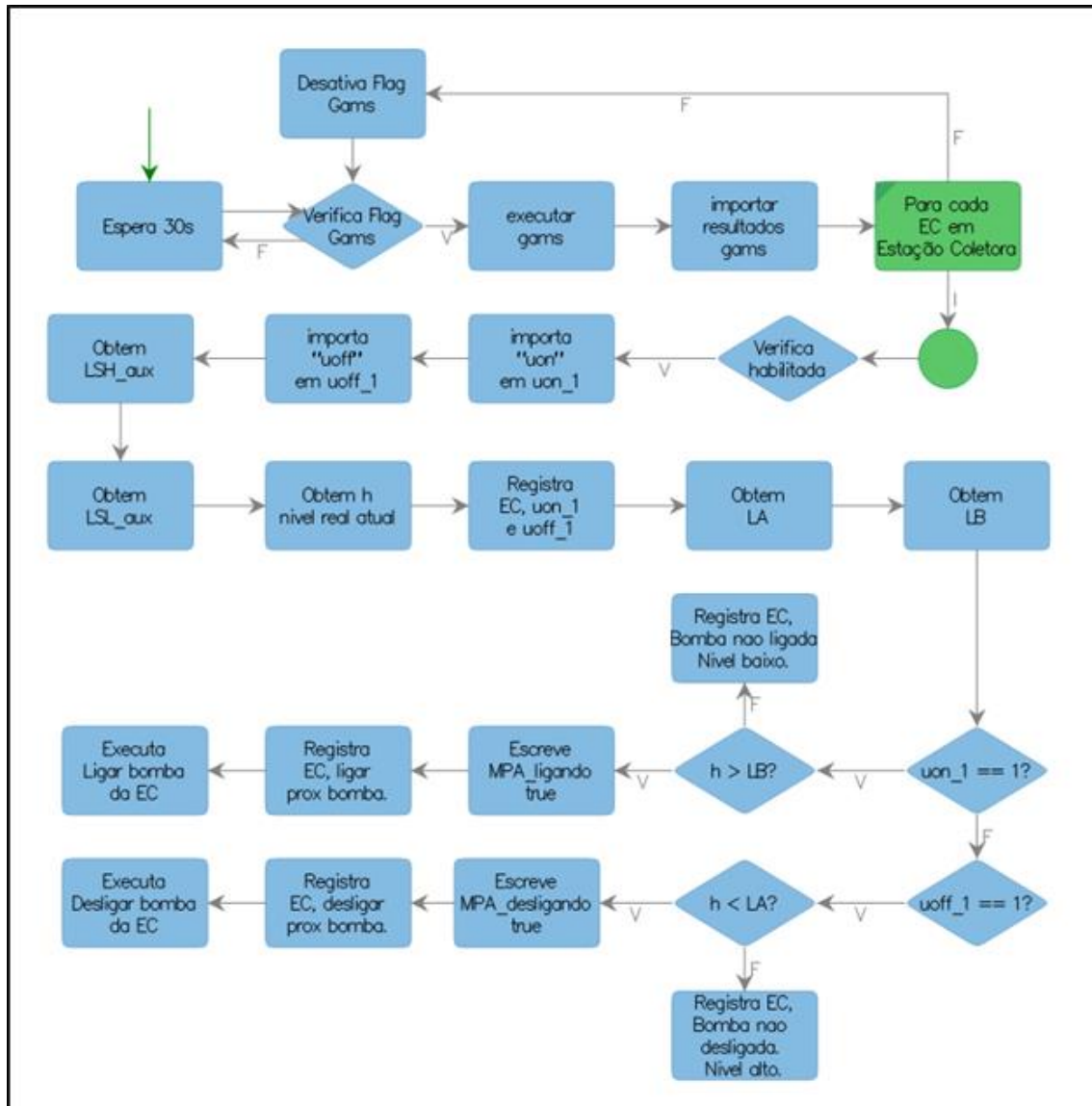
```

APÊNDICE2 DIAGRAMA: Inicia Fluxos Gams

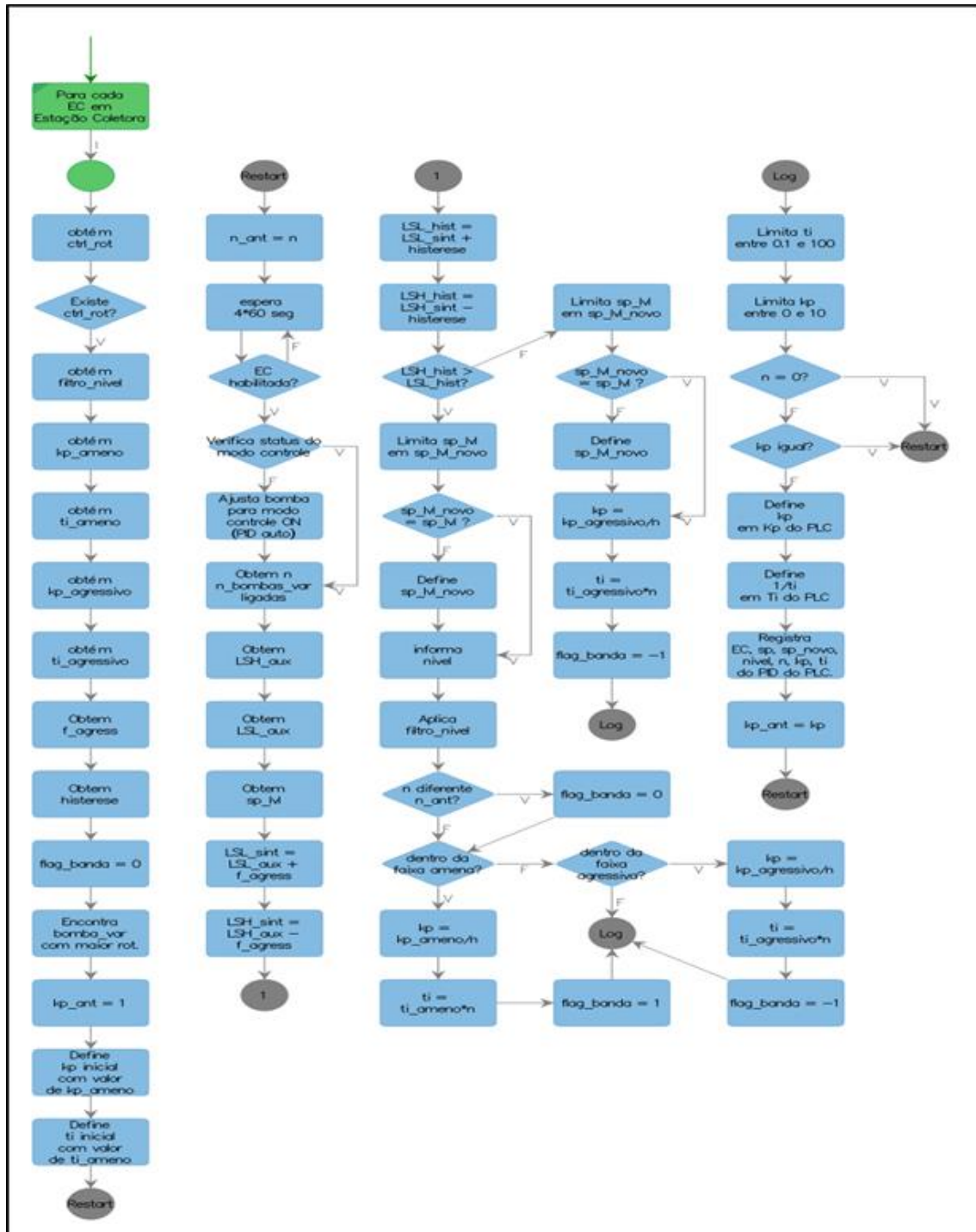
APÊNDICE3 DIAGRAMA: Gams Atualizar Cond



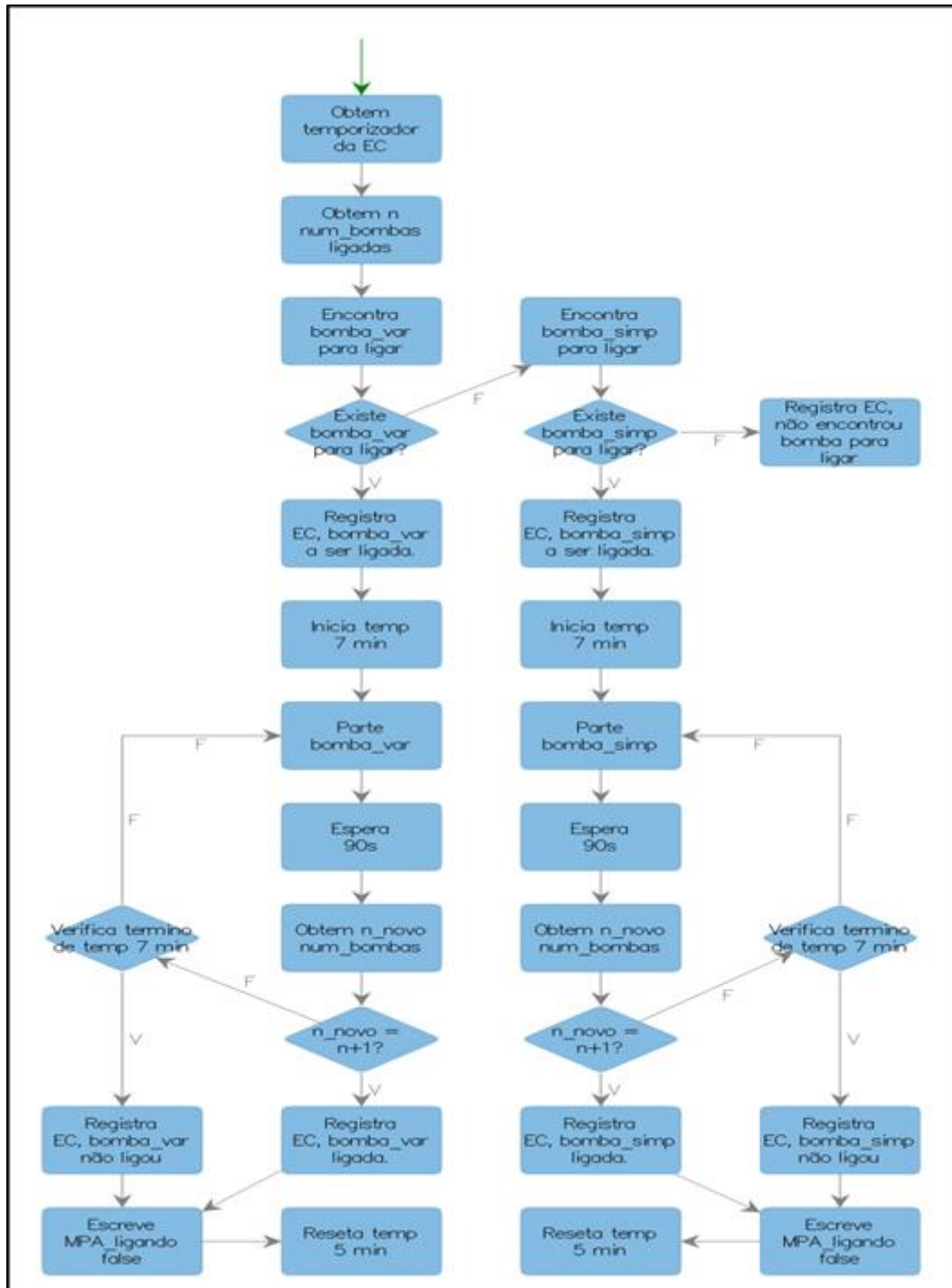
APÊNDICE4 DIAGRAMA: Gams Executa



APÊNDICE5 DIAGRAMA: Ajuste sintonia PID Bombas com Variador



APÊNDICE6 DIAGRAMA: Ligar bomba da EC



APÊNDICE7 DIAGRAMA: Desligar bomba da EC

