



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL GOMES DIAS MARTINS

**OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO UTILIZANDO GÁS
NATURAL ATRAVÉS DO MÉTODO DOS POLIEDROS FLEXÍVEIS**

VITÓRIA

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL GOMES DIAS MARTINS

**OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO UTILIZANDO GÁS
NATURAL ATRAVÉS DO MÉTODO DOS POLIEDROS FLEXÍVEIS**

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Espírito Santo,
como requisito para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. D.Sc. João Luiz Marcon
Donatelli

VITÓRIA

2011

RAFAEL GOMES DIAS MARTINS

**OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO UTILIZANDO GÁS
NATURAL ATRAVÉS DO MÉTODO DOS POLIEDROS FLEXÍVEIS**

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em _____ de _____ de 2011

Orientador: Prof. D.Sc. João Luiz Marcon Donatelli
Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador: Prof. D.Sc. José Joaquim Conceição
Soares Santos
Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador: Prof. M.Sc. Leonardo Rodrigues de
Araújo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Espírito Santo

Dedico este trabalho aos meus pais
Antônio Carlos Martins e Denise
Clara Gomes Dias Martins pelo amor
e carinho que sempre me deram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus que me deu força e sabedoria para chegar até aqui.

Aos meus pais por terem trabalhado em dobro e terem dado todo o suor para que eu concluísse esse curso de graduação.

Aos meus irmãos e familiares por todos os momentos divertidos proporcionados.

À minha namorada Deborah pelo carinho e compreensão nas horas em que eu precisava estudar.

Ao meu professor orientador Dr. João Luiz Marcon Donatelli.

Aos meus amigos que me ajudaram ao longo de todo o curso, sejam nos estudos, sejam nos momentos de diversão.

À ANP, Agência Nacional do Petróleo, pelo incentivo financeiro dado através das bolsas de pesquisa do programa PRH-29b.

RESUMO

Neste trabalho foi realizada a modelagem de um sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa e caldeira de recuperação de calor, semelhante ao sistema de cogeração do problema conhecido como CGAM. Essa modelagem foi desenvolvida no ambiente de um simulador de processo disponível comercialmente que apresenta uma integração dinâmica com o MS-Excel, onde a rotina de otimização utilizada foi escrita na linguagem Visual Basic. Assim, o sistema de cogeração modelado no IPSEpro difere do CGAM no que se refere aos modelos termodinâmico e físico, sendo o modelo econômico comum entre as duas modelagens. Então o referido sistema de cogeração foi simulado e otimizado no ambiente combinado IPSEpro – MS-Excel, sendo os resultados obtidos devidamente analisados e discutidos no corpo deste trabalho. Tais resultados permitem avaliar como as variáveis de decisão se comportam durante o progresso dos cálculos de simulação e otimização, o desempenho do método de otimização, bem como a comparação dos resultados de custos e propriedades dos fluxos com os resultados obtidos na solução convencional do sistema CGAM

Palavras-chave: Otimização. Simuladores de processo. Cogeração. Modelagem. Sistemas Térmicos.

ABSTRACT

In this work, it was performed the modeling of a cogeneration system with a regenerative gas turbine and heat recovery steam generator, similar to the problem known as CGAM. This modeling was developed in an environment of a commercially available process simulator, which provides a dynamic integration with MS-Excel, where the optimization routine used was written in Visual Basic language. Thus, the cogeneration system modeled on the IPSEpro differs from the CGAM in the physical and thermodynamic models, being the economic model common between the two modeling. So, the cogeneration system was simulated and optimized in the embedded environment IPSEpro - MS-Excel, and the results were properly analyzed and discussed in the this work. These results allow us to evaluate how the decision variables behave during the progress of the simulation calculations and optimization, the performance optimization method, and the comparison of costs and results of flow properties with the results obtained in the conventional solution of the system CGAM.

Keywords: Optimization. Process Simulator. Cogeneration. Modeling. Thermal Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representação de um sistema de turbina a gás no IPSEpro.....	20
Figura 3.2 – Representação da integração entre Excel e IPSEpro	21
Figura 4.1 – Representação esquemática de um processo envolvendo otimização .	22
Figura 4.2 – Esquema do método dos poliedros flexíveis	26
Figura 4.3 – Fluxograma do método dos poliedros flexíveis	27
Figura 5.1 – O Sistema CGAM.....	28
Figura 6.1 – Representação do Sistema CGAM no IPSEpro	38
Figura 6.2 – Resultado da simulação usando o ponto ótimo encontrado pela referência (CGAM)	40
Figura 7.1 – Comportamento das taxas de custos no caso 1	47
Figura 7.2 – Comportamento das variáveis de decisão no caso 1.....	48
Figura 7.3 – Comportamento dos custos de investimento no caso 1.....	49
Figura 7.4 – Sistema otimizado para o caso 1	50
Figura 7.5 – Sistema otimizado para o caso 2	53
Figura 7.6 – Comportamento das variáveis de decisão no caso 2.....	56
Figura 7.7 – Comportamento dos custos de investimento no caso 2.....	56
Figura 7.8 – Comportamento das taxas de custos no caso 2.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Equações dos custos de aquisição ou compra dos componentes	37
Tabela 5.2 – Constantes usadas nas equações da Tabela 5.1.....	37
Tabela 6.1 – Valores do ponto ótimo do sistema CGAM.....	39
Tabela 6.2 – Resultado obtido através da simulação do sistema CGAM no IPSEpro	41
Tabela 6.3 – Resultado obtido na solução convencional do problema CGAM.....	41
Tabela 7.1 – Valores iniciais das variáveis de decisão para o caso 1.....	44
Tabela 7.2 – Limites de tolerância das variáveis de decisão para o caso 1	44
Tabela 7.3 – Ponto ótimo obtido no caso 1	46
Tabela 7.4 – Resultado obtido através da otimização do caso 1	46
Tabela 7.5 – Custos obtidos através da otimização do caso 1.....	46
Tabela 7.6 – Comparação entre os resultados obtidos pelo método dos poliedros flexíveis e o sistema de referência	50
Tabela 7.7 – Comparação entre os custos.....	51
Tabela 7.8 – Valores iniciais para as variáveis de decisão no caso 2.....	52
Tabela 7.9 – Limites de tolerância das variáveis de decisão para o caso 2.....	53
Tabela 7.10 – Ponto ótimo encontrado para o caso 2.....	54
Tabela 7.11 – comparação entre custos obtidos nos casos 1 e 2.....	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. MOTIVAÇÃO	12
1.2. OBJETIVO	12
1.3. ESCOPO DO TRABALHO	13
2. MODELAGEM DE SISTEMAS TÉRMICOS	15
3. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS	16
3.1. SIMULADOR DE PROCESSOS TERMODINÂMICOS	16
3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SIMULADORES DE PROCESSO	17
3.3. O IPSEPRO	19
3.3.1. Troca de informações entre o MS-Excel e o IPSEpro	20
4. OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS	22
4.1. CONCEITO DE OTIMIZAÇÃO	22
4.2. ELEMENTOS COMUNS EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO	23
4.2.1. Função objetivo	23
4.2.2. Variáveis de decisão	24
4.2.3. Critério	24
4.2.4. Restrições	24
4.2.5. Região Viável	25
4.3. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	25

4.4. MÉTODO DOS POLIEDROS FLEXÍVEIS	26
5. O SISTEMA CGAM	28
5.1. MODELO FÍSICO DO SISTEMA CGAM.....	29
5.2. MODELO TERMODINÂMICO DO SISTEMA CGAM.....	33
5.3. MODELO ECONÔMICO DO SISTEMA CGAM	36
6. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA CGAM NO IPSEPRO	38
6.1. SIMULAÇÃO NO AMBIENTE PSE DO IPSEPRO	38
6.2. RESULTADO DA SIMULAÇÃO	40
7. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA CGAM UTILIZANDO O IPSEPRO	43
7.1. FUNÇÃO OBJETIVO DO SISTEMA CGAM.....	43
7.2. VALORES INICIAIS E LIMITES DE BUSCA PARA O CASO 1	44
7.3. RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO PARA O CASO 1.....	44
7.4. COMPARAÇÃO DO RESULTADO DO CASO 1 COM O RESULTADO OBTIDO PELOS AUTORES DO PROBLEMA CGAM	49
7.5. VALORES INICIAIS PARA O CASO 2	52
7.6. RESULTADO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO PARA O CASO 2	53
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES	58
REFERÊNCIAS.....	60
ANEXO A.....	61
ANEXO B	63

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Nas últimas décadas, a área da termodinâmica cresceu bastante dentro da engenharia. O estudo de ciclos térmicos tornou-se essencial para a utilização eficiente da energia e, portanto, vem sendo cada vez mais aperfeiçoado. Além disso, tendo em vista a crescente demanda de energia nas indústrias brasileiras, especificamente, nas indústrias de petróleo, e também o crescente uso do gás natural, faz-se necessário um estudo para otimizar cada vez mais a utilização de recursos naturais não-renováveis, mais especificamente o gás natural, em sistemas térmicos de cogeração para geração de energia elétrica e vapor.

Com a evolução tecnológica dos computadores, o uso de programas computacionais tornou-se um recurso bastante eficiente, sendo utilizado para obtenção de análises mais detalhadas e com resultados mais acurados. Além de dar condições favoráveis para realizar uma simulação de processos, a melhoria dos recursos computacionais, bem como a melhoria das velocidades de processamento de dados, têm permitido aperfeiçoar os processos já existentes além de possibilitar a construção de novos projetos à uma maneira eficaz com custos reduzidos. Uma inovação nos modelos de otimização implicará em mais economia de gás natural e melhor aproveitamento de energia que seria desperdiçada em sistemas convencionais.

1.2. OBJETIVO

Desenvolver um procedimento sistemático para modelagem, simulação e otimização de sistemas térmicos, capaz de ser aplicado para obtenção de projetos e operações otimizadas destes sistemas.

Como objetivos principais cita-se:

- Estudar o comportamento do simulador de processos IPSEpro, sua modelagem e forma com a qual ele resolve um sistema de equações;
- Testar um método de otimização matemática em um sistema de cogeração pré-definido;
- Analisar os resultados e obter conclusões.

1.3. ESCOPO DO TRABALHO

Nesta introdução é explicado a razão da utilização de um simulador de processos aliado ao problema de otimização de um sistema térmico. O Capítulo 3 deste trabalho é dedicado à simulação de processos, mais especificadamente processos termodinâmicos, enquanto no Capítulo 4, trata-se do conceito e elementos comuns, bem como classificação dos métodos de otimização usualmente empregados.

A aplicação do método matemático ao problema de otimização implica na alteração dos valores das variáveis de decisão a cada iteração do algoritmo, dentro de uma região coerente e pré-definida (ver Capítulo 4). A cada iteração do algoritmo, faz-se necessário o cálculo da função objetivo, o que implica na resolução do sistema de equações que compõe o problema. Para resolver esse sistema têm-se duas opções:

- Implementação computacional das equações e utilização de uma rotina para a solução desse sistema de equações;
- Utilização de um simulador de processos.

A implementação computacional das equações tem como vantagem a possibilidade de implementar o próprio modelo de equações (ver Capítulo 2), sejam eles físicos ou termodinâmicos. Em contrapartida, para um sistema térmico complexo, que não é o caso do CGAM, no qual é difícil a explicitação de todas as equações dos modelos físico e termodinâmico, essa implementação se mostra ineficiente, uma vez que dispende muito trabalho sem resultados relevantes.

De fato, a utilização de um *software* de simulação de processos termodinâmicos é uma forma mais eficaz e segura de tratar problemas de otimização de sistemas térmicos, pois facilita a implementação computacional das rotinas de otimização, uma vez que as restrições impostas pelos modelos físico e termodinâmico são tratadas pelo simulador (ver Capítulo 3). Nos capítulos 6 e 7, tem-se os procedimentos e resultados da simulação e otimização do sistema CGAM no ambiente do simulador IPSEpro (ver seção 3.3) respectivamente. O trabalho é encerrado com o Capítulo 8, no qual são relatadas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2. MODELAGEM DE SISTEMAS TÉRMICOS

A modelagem de um sistema é essencial para a previsão do comportamento físico e econômico de um processo. Segundo PERLINGEIRO (2005), a previsão do comportamento de um sistema consiste em antecipar como um processo, que ainda não existe, deverá se comportar depois de montado e colocado em operação. Tal previsão é feita com o auxílio de modelos matemáticos.

O modelo matemático (aqui se entende por modelo matemático os modelos físicos, econômicos e termodinâmicos) de um sistema térmico é formado pelo conjunto dos modelos dos equipamentos que compõem o processo. O modelo de um equipamento é constituído pelo sistema de equações que regem seu comportamento. Em sistemas térmicos, geralmente, essas equações são oriundas dos balanços de massa energia de um determinado volume de controle.

O modelo utilizado depende muito do grau de detalhamento que o projetista deseja, podendo ou não incluir, por exemplo, fatores econômicos, limites ambientais, etc.

Com o modelo já pronto, parte-se para uma outra fase do projeto de um sistema, o dimensionamento e a simulação.

O dimensionamento consiste em calcular as dimensões principais dos equipamentos com base nas equações propostas na modelagem, enquanto que, na simulação, o modelo é utilizado para reproduzir o comportamento de um processo já dimensionado quando operado em outras condições de fluxo como vazões, quantidade de calor trocado, entre outros, deixando fixos os valores de tamanhos de equipamentos como, por exemplo, áreas de troca térmica em trocadores de calor e caldeiras. O Capítulo 3 trata da simulação de processos.

3. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS

Nas últimas décadas, a simulação de processos é cada vez mais utilizada nas indústrias químicas, petroquímicas e nas empresas de projeto de equipamentos, principalmente no que diz respeito ao projeto de novas unidades de produção, estudos de ampliação de capacidade de processamento, avaliação de unidades existentes e na concepção e avaliação de novas tecnologias.

A simulação também é muito utilizada para fazer análises térmicas, dimensionamento, análise de custos e otimizações requeridas para o desenvolvimento do projeto de um sistema térmico.

SILVA (2005) salienta que, no caso específico das engenharias, a adoção da técnica de simulação tem trazido benefícios como: (a) a previsão de resultados na execução de uma determinada ação, (b) a redução de riscos na tomada decisão, (c) a identificação de problemas antes mesmo de suas ocorrências, (d) a eliminação de procedimentos em arranjos industriais que não agregam valor a produção, (e) a realização de análises de sensibilidade, (f) a redução de custos com o emprego de recursos (mão-de-obra, energia, água e estrutura física) e (g) a revelação da integridade e viabilidade de um determinado projeto em termos técnicos e econômicos.

3.1. SIMULADOR DE PROCESSOS TERMODINÂMICOS

Os simuladores de processos termodinâmicos têm como objetivo principal efetuar os balanços de massa, energia e entropia de sistemas térmicos. De um modo geral, os simuladores apresentam uma interface gráfica composta por blocos representativos de equipamentos ou componentes usuais em sistemas térmicos

como turbinas, compressores, bombas, etc. Através da simulação computacional, análises que antes eram feitas através de tabelas e cálculos exaustivos, atualmente são feitas de forma visual utilizando-se dessa interface incorporada aos simuladores, o que permite compreender melhor o processo e consequentemente obter melhores resultados.

Dentre as inúmeras vantagens da utilização de simuladores de processos, é importante citar também algumas limitações tais como:

- A simulação não pode dar resultados por si só. É preciso ter conhecimento prévio do processo e das equações que regem os modelos dos componentes e fluidos;
- Como qualquer programa computacional, a simulação não pode gerar resultados precisos se os dados de entrada não forem precisos.

Neste trabalho, a utilização de um simulador de processos tem como objetivo eliminar a necessidade de implementação computacional dos modelos físico e termodinâmico dos sistemas térmicos analisados, uma vez que, o propósito aqui é o de implementar uma rotina de otimização com o intuito de observar o comportamento das variáveis de decisão e sua influência nas demais variáveis. O simulador de processos a ser trabalhado precisa, então, possibilitar a implementação de tal rotina de otimização e ter uma flexibilidade quanto à configuração dos sistemas térmicos. Sendo assim, o simulador de sistemas térmicos IPSEpro (SIMTECH, 2000) apresenta-se como uma ferramenta eficiente nesse propósito. Na seção 3.3 será discutido um pouco mais sobre este *software*.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SIMULADORES DE PROCESSO

CORDEIRO (2007) diz que, em geral, os simuladores de processos apresentam estrutura modular sendo compostos por unidades representativas de componentes de sistemas térmicos. Estes simuladores subdividem-se em modulares sequenciais, modulares orientados a projeto e modulares orientados a equações. Os simuladores modulares sequenciais caracterizam-se por utilizar a saída de um

componente do sistema térmico como entrada para o componente seguinte. Os simuladores modulares orientados a equações são implementados de forma a equacionar e resolver um sistema de equações algébricas não lineares representativo do sistema térmico completo. DONATELLI (2002), em sua tese de doutorado classifica os simuladores da seguinte forma:

Modular Sequencial: Na abordagem modular sequencial a estrutura do programa é modular e as variáveis interagidas são variáveis de fluxo de recirculação. Nessa abordagem várias suposições são feitas para a obtenção da solução do problema. São elas:

- As variáveis associadas aos componentes, isto é, as variáveis de projeto, devem sempre ser definidas e não devem ser tratadas como incógnitas. A mesma suposição é feita para variáveis associadas com os fluxos que entram no processo.
- O fluxo de informações no modelo matemático deve coincidir com os fluxos físicos da planta. Essa suposição possibilita agrupar as variáveis em sub-vetores associados com o fluxo físico e selecionar para cada função uma variável associada com o fluxo de saída deixando o componente.

Essa abordagem é apropriada para a simulação de sistemas e processos. Entretanto, as suposições feitas tornam o seu uso inadequado para o projeto e otimização de sistemas e processos.

Modular orientado a projeto: A estrutura do programa é modular e as variáveis interagidas são variáveis de fluxo de recirculação e variáveis de projeto não especificadas. Através da estrutura modular orientada a projeto, é possível, com limitações, aplicá-la ao projeto e otimização de sistemas térmicos.

Modular orientado a equações: Nesta abordagem, apesar da sistemática de solução não ser modular, que é o critério de classificação usado em BEJAN, TSATSARONIS e MORAN (1996), aqui se considera a estrutura como sendo modular, visto que cada componente usado na configuração do sistema é modelado separadamente. No entanto, a modelagem do sistema térmico como um todo, realizada através da seleção e interligação adequada dos componentes (módulos),

produz um grande sistema de equações algébricas não lineares. Na solução desse sistema de equações as iterações são feitas simultaneamente sobre todas as incógnitas. Desta forma, tem-se total liberdade na definição das incógnitas, o que torna essa abordagem mais apropriada para projeto e otimização de sistemas térmicos.

O simulador de processos IPSEpro, citado anteriormente se enquadra nessa última categoria. A próxima seção é dedicada à esta importante ferramenta.

3.3. O IPSEpro

Como dito na seção anterior, o simulador de processos IPSEpro se enquadra na classificação de “estrutura modular orientado á equações” e é composto basicamente por três módulos: O módulo de simulação de processos denominado PSE (*Process Simulation Environment*), o módulo de desenvolvimento de modelos denominado MDK (*Model Development Kit*) e o módulo de integração do IPSEpro com o MS-Excel denominado PSE-Excel. Este último possibilita uma integração dinâmica e em tempo real do PSE com o MS-Excel de forma a trabalhar com os dois recursos simultaneamente no mesmo problema. A utilização do módulo PSE-Excel é fundamental em problemas otimização de sistemas térmicos como os abordados neste trabalho. Embora exista a possibilidade de se criar os próprios modelos físicos e termodinâmicos no IPSEpro através da ferramenta MDK, o programa traz consigo uma biblioteca de componentes denominada App_Lib (*Advanced Power Plant Library*), que contém os modelos físicos e termodinâmicos de diversos componentes/equipamentos usados em sistemas térmicos.

O simulador IPSEpro tem como grande vantagem a interface gráfica bem desenvolvida. Para um determinado projeto de sistema térmico, o IPSEpro dispõe de uma barra de ferramentas com botões bem representativos de componentes. O projetista deve selecionar esses botões e arrastar para a área de trabalho do IPSE, conectando-os através de linhas de fluxos. A Figura 3.1 ilustra a representação de

um sistema de turbina a gás, composto por um compressor na entrada, uma câmara de combustão e uma turbina propriamente dita.

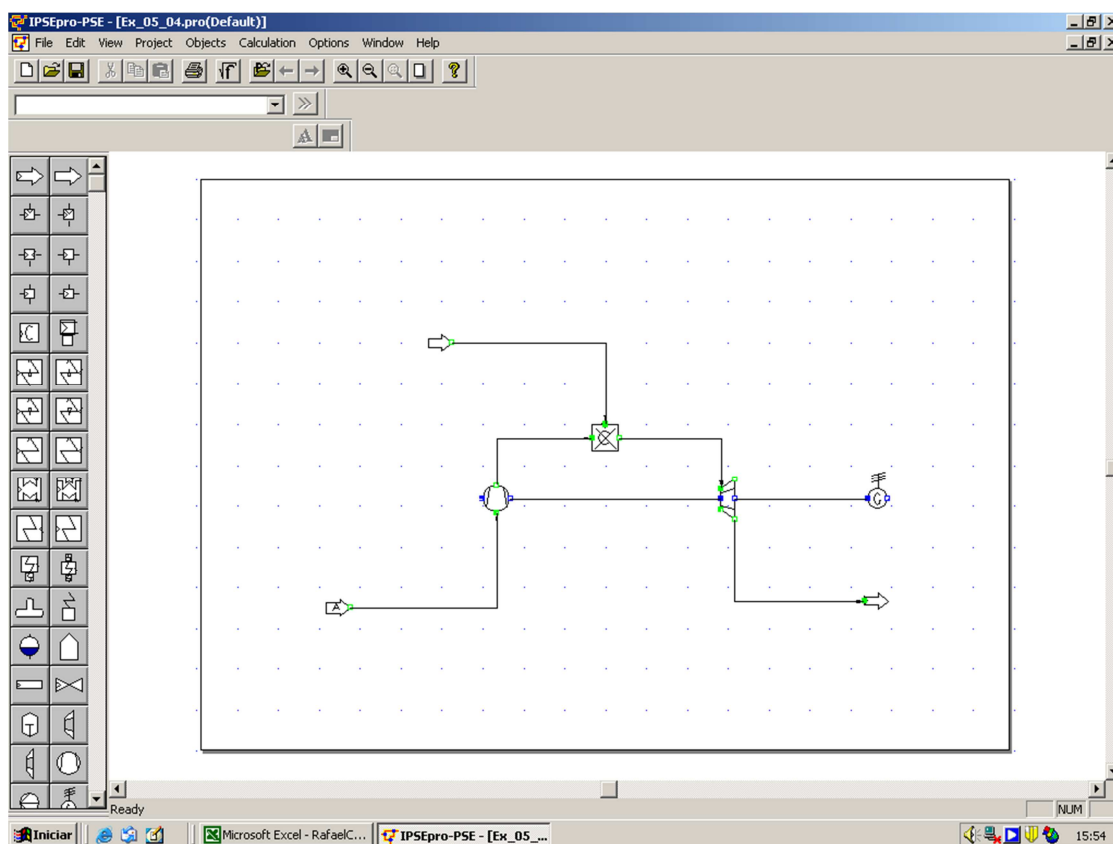


Figura 3.1 - Representação de um sistema de turbina à gás no IPSEpro

3.3.1. Troca de informações entre o MS-Excel e o IPSEpro

A transferência de dados entre o MS-Excel e o IPSEpro é dada através do módulo PSE-MS Excel, o qual possibilita a inserção de dados de um projeto do módulo PSE em planilhas do MS-Excel. Outra característica do PSE-MS Excel é gerar uma série de diferentes cálculos no projeto PSE, variando os valores dos itens dos modelos dos componentes em seu projeto. Estas variações são então atualizadas na planilha do Excel (SIMTECH, 2000). Este módulo é bastante útil, pois permite o usuário facilmente promover uma variação nos cálculos e variáveis do projeto criado no ambiente do simulador e mostrar esta variação em forma de gráficos e tabelas através do Excel.

Os comandos utilizados para realizar a troca de informações são:

- ***SendItem***: este comando atribui valor a uma variável associada a um modelo de um projeto do IPSEpro.
- ***RequestItem***: este comando transfere para uma planilha em Excel o valor de uma variável associada a um modelo de um projeto do IPSEpro.

Adicionalmente, o comando *RunCalculation* tem a função de iniciar os cálculos para a resolução dos sistemas de equações gerados pelos modelos, o que implica na inicialização da simulação do sistema térmico.

A integração entre a rotina computacional implementada no MS-Excel e o processo implementado no ambiente do PSE é representada esquematicamente na Figura 3.2.

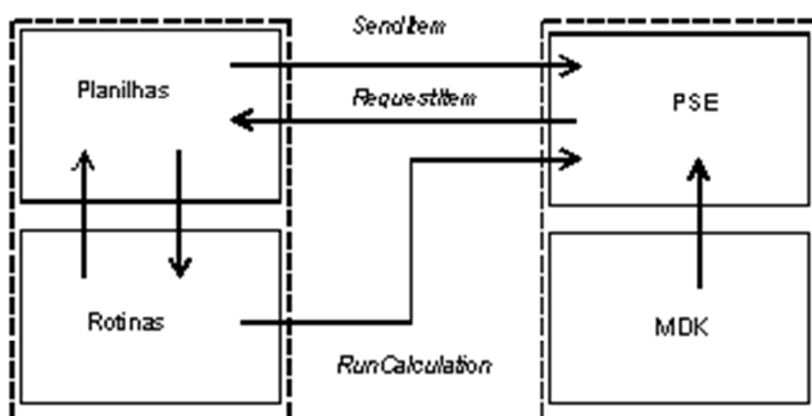


Figura 3.2 - Representação da integração entre Excel e IPSEpro.

4. OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS

4.1. CONCEITO DE OTIMIZAÇÃO

Como já foi dito, a modelagem de um sistema térmico gera um sistema de equações provenientes dos modelos físicos e termodinâmicos dos equipamentos tais como turbinas, compressores, etc. A resolução desse sistema de equações resulta numa das seguintes situações:

- O problema não admite solução;
- O problema admite uma solução única;
- O problema admite mais de uma solução.

A primeira situação ocorre quando as equações são em números excessivos ou inconsistentes. A segunda ocorre quando tais equações são consistentes, entretanto não deixam graus de liberdade no sistema de equações. Na terceira situação, temos um número de incógnitas, ou variáveis de decisão, maior que o número de equações, dando margem a graus de liberdade. Aqui é onde entra a otimização, ou seja, neste contexto, otimizar é definido como a busca da solução ótima dentro as inúmeras soluções do sistema de equações obtido pela modelagem do sistema térmico. A Figura 4.1 mostra um esquema de um processo envolvendo otimização.

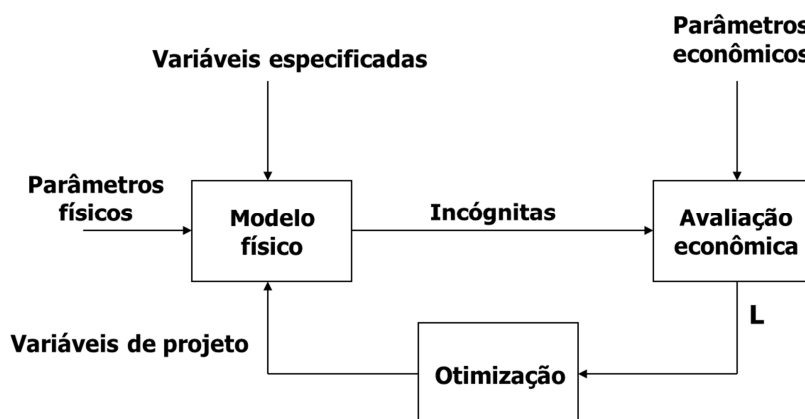


Figura 4.1 - Representação esquemática de um processo envolvendo otimização.
(Perlingeiro,2005)

PERLINGEIRO (2005) diz que é importante reconhecer que todo problema de otimização compreende uma conjugação de fatores conflitantes. Por exemplo, em um dimensionamento de uma câmara de combustão, o aumento da vazão de combustível implica em um aumento na temperatura dos gases de combustão, o que, conseqüentemente aumenta o trabalho líquido da turbina a gás que aproveitará esses gases, aumentando assim o lucro da planta. Em contrapartida, esse mesmo aumento na vazão aumenta o custo de combustível gasto no sistema, acarretando assim em uma diminuição do lucro da planta. A vazão ótima, que produz o lucro ótimo, é o ponto de equilíbrio desses dois fatores.

4.2. ELEMENTOS COMUNS EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

É comum encontrar, em todos os problemas de otimização, independente do campo de aplicação, os seguintes elementos:

- Função Objetivo
- Variáveis de Decisão
- Critério
- Restrições
- Região Viável

4.2.1. Função objetivo

É a expressão matemática do critério de otimização em termos das variáveis físicas do sistema. Em um problema de otimização de um sistema térmico, a função objetivo representa, usualmente o custo de geração e manutenção dos equipamentos, bem como o custo de combustível, se este fizer parte do sistema, como é o caso de sistemas constituídos por turbinas a gás e/ou caldeiras em que ocorre combustão própria. A função objetivo é decorrente da aplicação dos modelos físico, termodinâmico e econômico do sistema térmico analisado.

4.2.2. Variáveis de decisão

Após a aplicação dos modelos físico e termodinâmico ao sistema térmico, faz-se necessário definir um conjunto de variáveis termodinâmicas de forma a solucionar o sistema de equações resultantes dos balanços de massa e energia. Em problemas de otimização, este conjunto de variáveis é denominado variáveis de decisão. Seu número define o número de graus de liberdade do sistema de equações, sendo a função objetivo função dessas variáveis. Como já dito, os métodos de otimização chegam à solução ótima através da manipulação dessas variáveis. Segundo PERLINGEIRO (2005), a escolha das variáveis de decisão, ou variáveis de projeto, não afeta a solução ótima, mas apenas o esforço computacional envolvido.

4.2.3. Critério

O critério define a solução ótima do problema. O critério mais comum, principalmente em projeto de sistemas térmicos, é o de natureza econômica. Segurança, controlabilidade e outros critérios também podem ser adotados.

PERLINGEIRO (2005) diz que a solução ótima segundo um critério pode não ser a ótima segundo outro. Por exemplo, a solução mais econômica pode não ser a mais segura. Para atender a mais de um critério, a solução deve ser obtida por métodos de Otimização com Objetivos Múltiplos, em que o projetista pode atribuir pesos diferentes a cada critério em função da importância de cada um.

4.2.4. Restrições

As restrições são limites estabelecidos por valores coerentes que vão de acordo com o comportamento físico e natural do sistema. Por exemplo, na otimização de um sistema que tenha uma turbina a vapor como componente, pode

ser que o resultado do processo de otimização gere uma temperatura de entrada muito alta e maior que a suportada pelas palhetas da turbina. Neste caso deve-se estabelecer um limite para essa temperatura.

4.2.5. Região Viável

Compreende a região definida pelas variáveis de decisão e delimitada pelas restrições, em cujo interior ou fronteira se localiza o máximo ou o mínimo da função objetivo. O conhecimento prévio dessa região é fundamental para minimizar o esforço computacional.

4.3. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Os métodos de otimização podem ser classificados quanto à natureza como Analíticos ou Numéricos. Quanto à estratégia de cálculo podem ser classificados como Diretos ou Indiretos.

Nos métodos Diretos, as decisões são tomadas a partir dos valores da função objetivo, ou seja, eles se caracterizam por utilizar apenas valores da função a ser otimizada, não sendo calculadas valores de derivadas dessa função. Segundo CORDEIRO (2006), estes métodos possuem a limitação de retornar como resultado um ponto extremo local quando aplicados a funções multimodais. Como exemplos de métodos diretos cita-se o método de HOOKE e JEEVES (1966), do qual, a descrição se encontra no Anexo B, e o método dos Poliedros Flexíveis (NELDER e MEAD, 1965). Já nos métodos Indiretos, os cálculos empregam valores das derivadas da função objetivo. Computacionalmente falando, os métodos indiretos podem apresentar valores mais precisos, porém demandam um esforço maior.

Neste trabalho, como já mencionado, é utilizado o método dos Poliedros Flexíveis proposto por NELDER e MEAD (1965) para o trabalho de otimização do

sistema CGAM. A descrição desse método se encontra na próxima seção deste capítulo.

4.4. MÉTODO DOS POLIEDROS FLEXÍVEIS

O método dos Poliedros Flexíveis é um método de busca direta, efetivo e de relativa facilidade de implementação computacional. Esse método consiste em minimizar uma função de mais de uma variável utilizando os vértices de um poliedro flexível. Cada vértice do poliedro representa um ponto do espaço de busca. O vértice para o qual a função objetivo apresenta valor máximo é projetado em relação ao centróide dos vértices remanescentes. Desta maneira, a função objetivo tem seu valor sucessivamente reduzido pela substituição de vértices que apresentam valores elevados da função objetivo por vértices que apresentam valores menores até que os vértices do poliedro estejam suficientemente próximos. Este método é composto por quatro fases, **reflexão**, **contração**, **expansão** e **redução**. A Figura 4.2 representa, através de um fluxograma, o método com suas respectivas equações. Na Figura 4.3 há uma representação esquemática do funcionamento do método.

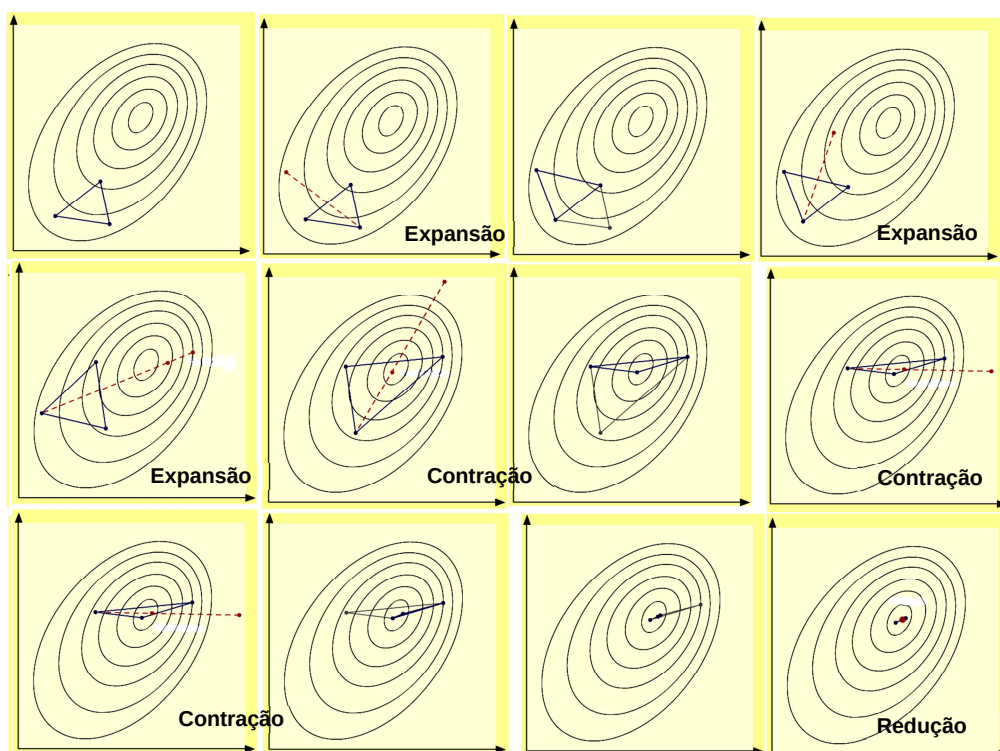


Figura 4.2 – Esquema do método dos poliedros flexíveis

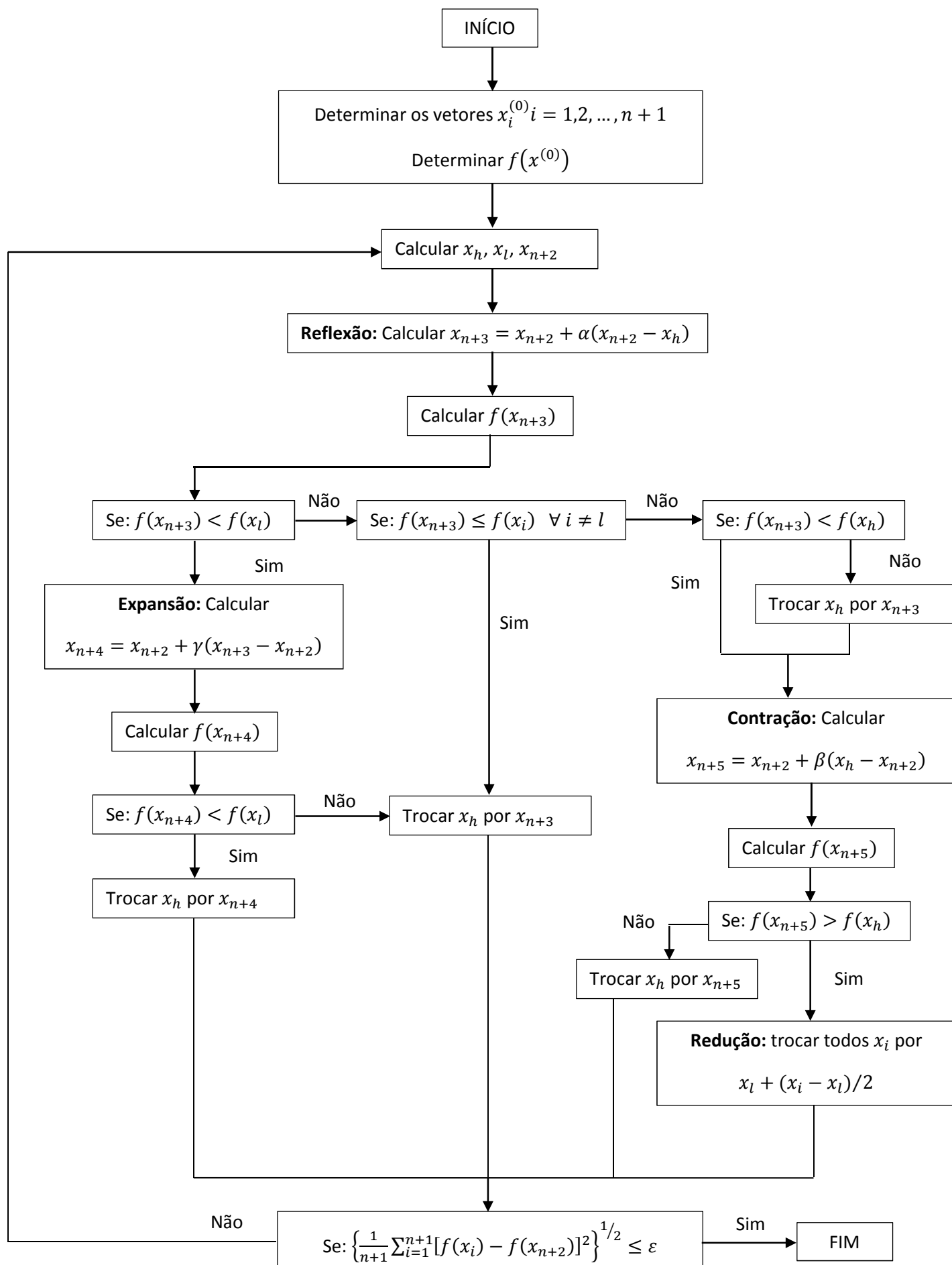


Figura 4.3 – Fluxograma do método dos poliedros flexíveis

5. O SISTEMA CGAM

O sistema CGAM foi concebido no início da década de 90 por um grupo de especialistas e estudiosos da área de termoeconomia, tendo como objetivo a comparação de diferentes metodologias de otimização aplicadas a um mesmo problema. A sigla CGAM deriva das iniciais dos autores, a saber: Christos Frangopoulos, Georges Tsatsaronis, Antonio Valero e Michael Von Spakovsky. A Figura 5.1 ilustra o sistema proposto.

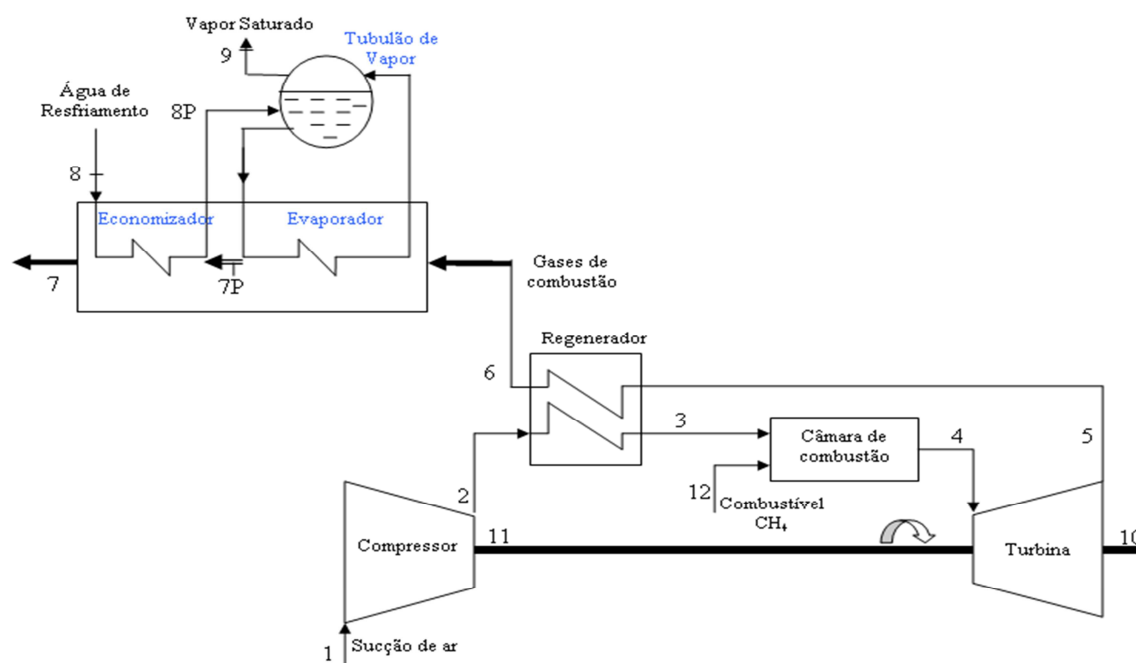


Figura 5.1 - O Sistema CGAM

O problema CGAM se refere à uma planta de cogeração que entrega 30 MW de energia elétrica e 14 kg/s de vapor saturado à 20 bar. A instalação consiste em uma turbina a gás seguida de um pré-aquecedor de ar que usa parte da energia térmica dos gases de exaustão da turbina, e uma caldeira de recuperação de calor, onde o vapor é produzido. As condições ambientes são definidas como $T_0 = 298,15$ K e $P_0 = 1,013$ bar. O combustível utilizado na câmara de combustão é gás natural (admitido puro metano) com um poder calorífico inferior (PCI) igual a 50000 kJ/kg.

O ar inicialmente em condições ambiente de pressão e temperatura é admitido no compressor. No pré-aquecedor de ar, calor é transferido dos gases da combustão para o ar comprimido; tal medida tem como objetivo uma combustão mais eficiente. Após o processo de combustão, os gases da combustão expandem na turbina produzindo trabalho. No gerador de vapor por recuperação de calor, ocorre a transferência de calor dos produtos da combustão para a água de alimentação, fazendo com que esta atinja seu estado de saturação, possibilitando a extração de vapor saturado.

Segundo VALERO, *et al.*,(1994), a denominação “*The CGAM Problem*” (Problema CGAM) representa o problema de otimização aplicado ao sistema CGAM, com modelos físico, termodinâmico e econômico previamente definidos pelos autores.

As variáveis de decisão selecionadas para o problema de otimização são:

- A relação de Pressão no compressor (r_p);
- As eficiências isentrópicas do compressor (η_c) e da turbina (η_t);
- A temperatura do ar na entrada da câmara de combustão (T_3);
- A temperatura dos gases de combustão na saída da turbina (T_4).

5.1. MODELO FÍSICO DO SISTEMA CGAM

Nesta seção é apresentado o modelo físico dos equipamentos proposto pelos autores. É importante ressaltar que na confecção deste trabalho tal modelagem não foi utilizada, pois foi utilizada a modelagem do simulador de processos IPSEpro (SIMTECH, 2000), que será mencionada adiante.

O objetivo de mostrar a modelagem dos equipamentos aqui, mesmo que não utilizada, será o de, posteriormente, comparar com a modelagem usada pelo simulador, a fim de observar divergências entre as duas modelagens, o que poderá acarretar em diferenças nos resultados.

- Modelo do Compressor

A pressão e temperatura são iguais às do ar ambiente.

$$P_1 = P_0$$

$$T_1 = T_0$$

A temperatura do fluxo 2 é função da temperatura do fluxo 1, do rendimento isentrópico do compressor de ar e da relação entre as pressões na saída e na entrada do compressor de ar.

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}} - 1 \right] \right\} \quad (5.1)$$

A potência para acionamento do compressor de ar é calculada de acordo com a equação:

$$\dot{W}_C = \dot{W}_{11} = \dot{m}_a c_{p,a} (T_2 - T_1) \quad (5.2)$$

em que $\dot{m}_a$ é a vazão mássica de ar e $c_{p,a}$ é o calor específico do ar à pressão constante.

- Modelo da Câmara de Combustão

A vazão mássica dos gases da combustão é dada por:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_c \quad (5.3)$$

onde $\dot{m}_c$ é a vazão mássica de combustível.

Aplicando o balanço de energia na câmara de combustão, obtemos:

$$\dot{m}_a h_3 + \dot{m}_c PCI = \dot{m}_g h_4 + \dot{Q}_{cc} \quad (5.4)$$

sendo $PCI = 50000 \frac{kJ}{kgK}$ o poder calorífico inferior do combustível e $\dot{Q}_{cc}$ a taxa de transferência de calor entre a câmara de combustão e o ambiente. Essa taxa é dada por:

$$\dot{Q}_{cc} = \dot{m}_c PCI(1 - \eta_{cc}) \quad (5.5)$$

em que o rendimento da câmara de combustão é dado por $\eta_{cc} = 0,98$.

A pressão na saída é dada em função da pressão na entrada por

$$P_4 = P_3(1 - \Delta P_{cc})$$

onde a perda de carga ΔP_{cc} vale 0,05.

- Modelo do Regenerador (Pré-Aquecedor)

Aplicando o balanço de energia obtemos:

$$\dot{m}_a c_{p,a}(T_3 - T_2) = \dot{m}_g c_{p,g}(T_5 - T_6) \quad (5.6)$$

A pressão no fluxo 3 é calculada da mesma forma anterior, em função da pressão no fluxo 2 e da perda de carga.

$$P_3 = P_2(1 - \Delta P_{a,R})$$

$$\Delta P_{a,R} = 0,05$$

De maneira similar, a pressão do fluxo 6 é calculada a partir da pressão do fluxo 5 por:

$$P_6 = P_5(1 - \Delta P_{g,R})$$

$$\Delta P_{g,R} = 0,05$$

- Modelo da Turbina

A temperatura do fluxo 5 é função da temperatura do fluxo 4, do rendimento isentrópico da turbina à gás e da relação entre as pressões na entrada e na saída da turbina à gás.

$$T_5 = T_4 \left\{ 1 - \eta_t \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_5} \right)^{\frac{1-k_g}{k_g}} \right] \right\} \quad (5.7)$$

A potência gerada pela turbina a gás é dada por:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_g c_{p,g} (T_4 - T_5) \quad (5.8)$$

A potência líquida do sistema CGAM é obtida pela seguinte equação:

$$\dot{W}_{liq} = \dot{W}_t - \dot{W}_c = 30 MW \quad (5.9)$$

- Modelo da Caldeira de Recuperação de Calor

Aplicando o balanço de energia ao evaporador da caldeira de recuperação de calor, obtemos a seguinte equação:

$$\dot{m}_g c_{p,g} (T_6 - T_{7p}) = \dot{m}_s (h_9 - h_{8p}) \quad (5.10)$$

sendo que

$$\dot{m}_v = 14 \frac{kg}{s}$$

$$(h_9 - h_{8p}) = 1956 \frac{kJ}{kg}$$

A pressão do fluxo 6 é calculada a partir da pressão ambiente por:

$$P_0 = P_6 (1 - \Delta P_{HRSG})$$

onde:

$$\Delta_{HRSG} = 0,05$$

representa uma perda de carga de 5% para o fluxo dos gases da combustão através do gerador de vapor.

A temperatura da água na saída do pré-aquecedor da caldeira é dada por:

$$T_{8P} = T_9 - \Delta T_A$$

onde

$$\Delta T_A = 15K$$

A diferença de temperatura no *pinch point* é dada por:

$$\Delta T_P = T_{7P} - T_9 > 0$$

A temperatura do fluxo 7 é calculada pela seguinte equação:

$$T_7 = T_6 - \dot{m}_s \frac{(h_9 - h_8)}{(\dot{m}_g c_{p,g})} \quad (5.11)$$

onde:

$$(h_9 - h_8) = 2690 \frac{kJ}{kg}$$

5.2. MODELO TERMODINÂMICO DO SISTEMA CGAM

Para resolver o modelo físico e calcular as variáveis de estado para o Sistema CGAM original, utiliza-se um modelo simplificado para o cálculo das propriedades termodinâmicas das correntes de fluxo, conforme descrito a seguir.

- Ambiente de referência

Pressão – pressão atmosférica

$$P_0 = 1,013 \text{ bar}$$

Temperatura – temperatura ambiente

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

Substâncias de referência: ar com frações molares:

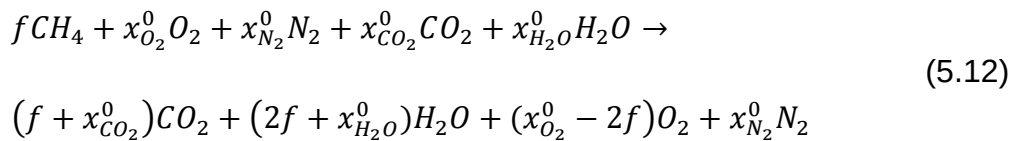
$$x_{O_2}^0 = 0,2059; x_{N_2}^0 = 0,7748; x_{CO_2}^0 = 0,0003; x_{H_2O}^0 = 0,0190$$

Nesse ambiente de referência, os valores da energia e exergia são nulos para cada substância de referência. Segundo VALERO, *et al.*, 1994, para os cálculos de balanço de energia, esta definição ambiente de referência é consistente com a definição do PCI.

- Composição química das correntes de fluxo

Os fluxos de ar 1,2 e 3 têm a mesma composição química do ambiente de referência. O combustível (corrente 12) é considerado metano puro.

Combustão completa é assumida na câmara de combustão segundo a reação:



Nessa equação, f é a razão molar combustível/ar.

Os pesos moleculares do metano e do ar são $M_{CH_4} = M_f = 16,043 \text{ kg/kmol}$ e $M_a = 28,648 \text{ kg/kmol}$ respectivamente.

- Valores de entalpia e exergia específicas

Exergia específica do combustível: $e_f = 51650 \text{ kJ/kg}$

Entalpia específica do combustível: $h_f = PCI = 51650 \text{ kJ/kg}$

As variações de entalpia e exergia para os fluxos de água e vapor são representadas pelas equações:

$$h_9 - h_8 = 2686,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \sim 2690 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_9 - h_{8P} = 1956 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$e_9 - e_8 = h_9 - h_8 - T_0(s_9 - s_8) = 909,1 \frac{kJ}{kg} \sim 910 \frac{kJ}{kg}$$

$$e_9 - e_{8P} = h_9 - h_{8P} - T_0(s_9 - s_{8P}) = 754 \frac{kJ}{kg}$$

A entalpia e a exergia para os fluxos de ar ($i = 1, 2$ e 3) são representadas por:

$$h_i = c_{p,a}(T_i - T_0) \quad (5.13)$$

$$e_i = c_{p,a} \left(T_i - T_0 - T_0 \ln \frac{T_i}{T_0} \right) + R_a T_0 \ln \frac{P_i}{P_0} \quad (5.14)$$

onde os valores das propriedades do ar são:

$$c_{p,a} = 1,004 \frac{kJ}{kgK}$$

$$\gamma_a = 1,4$$

$$R_a = 0,287 \frac{kJ}{kgK}$$

A entalpia e a exergia para os fluxos de gases de combustão ($i = 4, 5, 6$ e 7) são representadas por:

$$h_i = c_{p,g}(T_i - T_0) \quad (5.15)$$

$$e_i = c_{p,g} \left(T_i - T_0 - T_0 \ln \frac{T_i}{T_0} \right) + R_g T_0 \ln \frac{P_i}{P_0} + R_g T_0 \sum_j x_j^i \ln \frac{x_j^i}{x_j^0} \quad (5.16)$$

em que:

$$j = O_2, N_2, CO_2, H_2O$$

onde os valores das propriedades dos gases de combustão são:

$$c_{p,g} = 1,17 \frac{kJ}{kgK}$$

$$\gamma_g = 1,33$$

$$R_g = 0,290 \frac{kJ}{kgK}$$

5.3. MODELO ECONÔMICO DO SISTEMA CGAM

Ao avaliar os custos de uma planta térmica, é necessário considerar o custo anual do combustível e o custo anual associado à aquisição e operação de cada componente da planta. As expressões para a obtenção dos custos de compra dos componentes (Z) são apresentadas nas Tabelas 6.1 e 6.2. Baseado nestes custos, a equação geral para o custo por unidade de tempo ($\dot{Z}_i$ em \$/s) associado ao capital de investimento e ao custo de manutenção para i -ésimo componente é:

$$\dot{Z}_i = \frac{Z_i CRF \varphi}{N \times 3600} \quad (5.17)$$

Aqui, Z_i é o custo de compra do i -ésimo componente (\$), CRF é fator de recuperação (*capital recovery factor*) de capital adotado como ($CRF = 18,2\%$), N representa o número de horas de operação da planta por ano, considerado aqui ($N = 8000h$), e φ é o fator de manutenção ($\varphi = 1,06$).

O custo por unidade de tempo associado ao combustível é obtido de:

$$\dot{C}_c = c_c \dot{m}_c PCI \quad (5.18)$$

onde o custo de combustível por unidade de energia (com base no PCI) é

$$c_c = 0,004 \text{ \$/MJ}$$

O custo total de operação, por unidade de tempo, da instalação é obtido de:

$$\dot{C}_T = c_c \dot{m}_c PCI + \sum_{i=1}^5 \dot{Z}_i \quad (5.19)$$

onde $\dot{C}_T$ é o custo total por unidade de tempo associado ao combustível e aos equipamentos.

Na Tabela 5.1, ΔTML é a diferença de temperatura média logarítmica.

Tabela 5.1 – Equações dos custos de aquisição ou compra dos componentes (VALERO, et al., 1994)

Compressor	$Z_C = \left(\frac{C_{11} \dot{m}_a}{C_{12} - \eta_c} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$
Câmara de combustão	$Z_{CC} = \left(\frac{C_{21} \dot{m}_a}{C_{22} - \frac{P_4}{P_3}} \right) [1 + EXP(C_{23} T_4 - C_{24})]$
Turbina	$Z_T = \left(\frac{C_{31} \dot{m}_g}{C_{32} - \eta_T} \right) \ln \left(\frac{P_4}{P_5} \right) [1 + EXP(C_{33} T_4 - C_{34})]$
Pré-aquecedor	$Z_{PA} = C_{41} \left[\frac{\dot{m}_g (h_5 - h_6)}{U \times \Delta TML} \right]^{0,6}$
Caldeira de recuperação de calor	$Z_{CRC} = C_{51} \left[\left(\frac{\dot{Q}_{EC}}{\Delta TML_{EC}} \right)^{0,8} + \left(\frac{\dot{Q}_{EV}}{\Delta TML_{EV}} \right)^{0,8} \right] + C_{52} \dot{m}_v + C_{53} \dot{m}_g^{1,2}$

Tabela 5.2 – Constantes usadas nas equações da Tabela 5.1 (VALERO, et al., 1994)

Compressor	$C_{11} = 39,5 \text{ \$/ (kg/s)}; C_{12} = 0,9$
Câmara de combustão	$C_{21} = 25,6 \text{ \$/ (kg/s)}; C_{22} = 0,995$ $C_{23} = 0,018 \text{ (K}^{-1}\text{)}; C_{24} = 26,4$
Turbina	$C_{31} = 266,3 \text{ \$/ (kg/s)}; C_{32} = 0,92$ $C_{33} = 0,036 \text{ (K}^{-1}\text{)}; C_{34} = 54,4$
Pré-aquecedor	$C_{41} = 2290 \text{ \$/ (m}^{1,2}\text{)}; U = 18 \text{ kW/(m}^2\text{K)}$
Caldeira de recuperação de calor	$C_{51} = 3650 \text{ \$/ (kW/K)}^{0,8}; C_{52} = 11820 \text{ \$/ (kg/s)}$ $C_{53} = 658 \text{ \$/ (kg/s)}^{1,2}$

6. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA CGAM NO IPSEpro

Antes do trabalho de otimização, faz-se necessário simular o problema CGAM no simulador de processos. O simulador IPSEpro já foi descrito no Capítulo 3. Devido à complexidade que seria implementar a modelagem proposta no problema CGAM no simulador, optou-se por utilizar a modelagem padrão que vem junto ao programa na biblioteca App_Lib já mencionada anteriormente. O sistema com seus componentes é mostrado na Figura 6.1

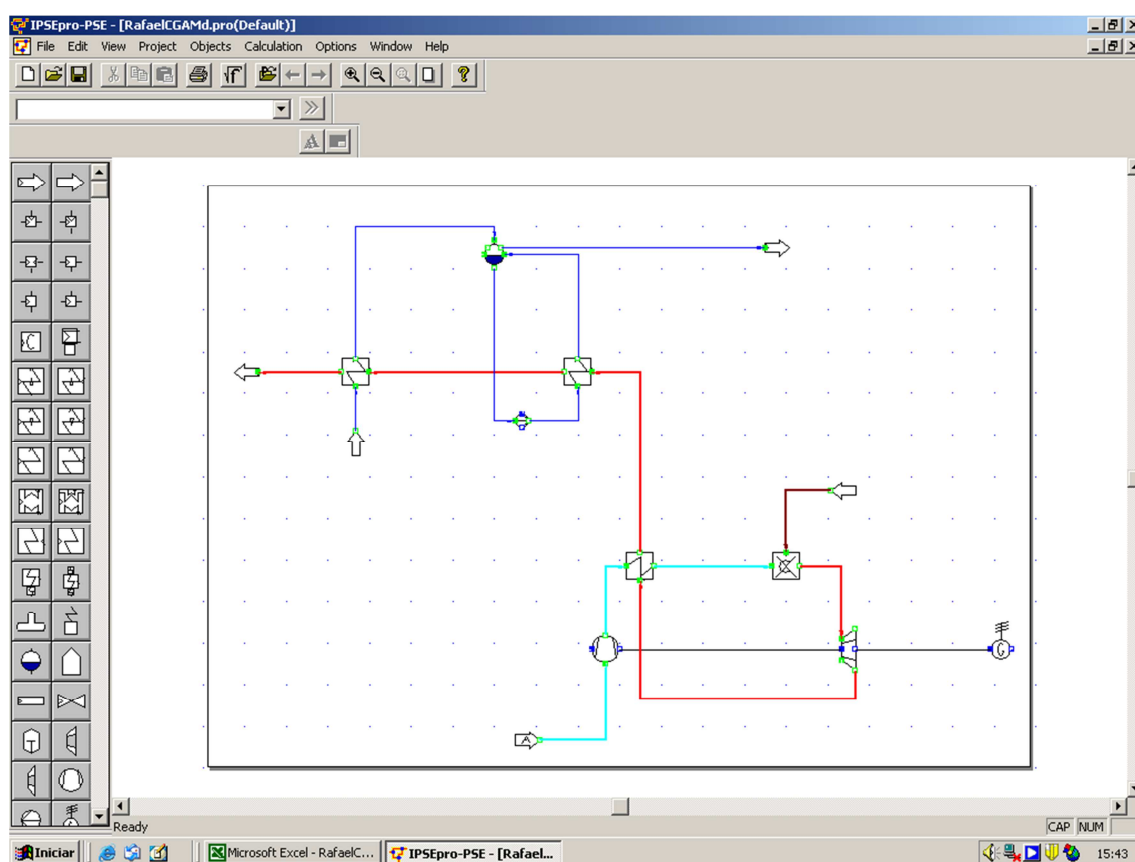


Figura 6.2 – Representação do Sistema CGAM no IPSEpro

6.1. SIMULAÇÃO NO AMBIENTE PSE DO IPSEPRO

Nesta fase do trabalho, o interesse ainda é de apenas simular o problema para testar a coerência da modelagem e fazer os devidos ajustes nas variáveis

especificadas e nos limites para as incógnitas evitando assim que o software não consiga simular o problema por incompatibilidade física com a realidade. Para essa simulação, não se usa um sistema com graus de liberdade, sendo assim, a solução aqui é única e ainda isenta do trabalho de otimização.

Os valores das propriedades, tanto físicas quanto termodinâmicas, são os mesmos proposto em VALERO, *et al.*,1994, no problema CGAM. Para as cinco variáveis independentes inicialmente utilizam-se valores fixos do resultado para o ponto ótimo encontrado na solução convencional do CGAM. Esses valores estão listados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores do ponto ótimo do sistema CGAM

Variáveis	Valor
P_1/P_2	8,5234
η_c	0,8468
T_3	640,85 °C
η_T	0,8786
T_4	1219,48 °C

Com esses valores tentou-se simular o sistema. Porém, a solução não convergiu, pois o valor de 640,85 °C na temperatura de entrada na câmara de combustão (T_3) é muito alto, e, de acordo com a modelagem do IPSE, esse valor implica numa temperatura de entrada na caldeira muito baixa, cerca de 430 °C. Esse valor é dito baixo porque, de acordo com a modelagem do IPSEpro, não é suficiente para promover a troca de calor necessária para tornar a água nos tubos de recirculação da caldeira vapor saturado. Isso faz com que a diferença de temperatura de “*pinch point*” torna-se negativa. O simulador entende isso como um erro e não continua a resolução do sistema de equações. A Figura 6.2 mostra o resultado da simulação com esses valores. Nela é possível perceber que o valor da temperatura dos gases ao passar pelo evaporador (T_{7P}) é de 176,05 °C, que é menor do que a temperatura de saturação da água (212,38 °C).

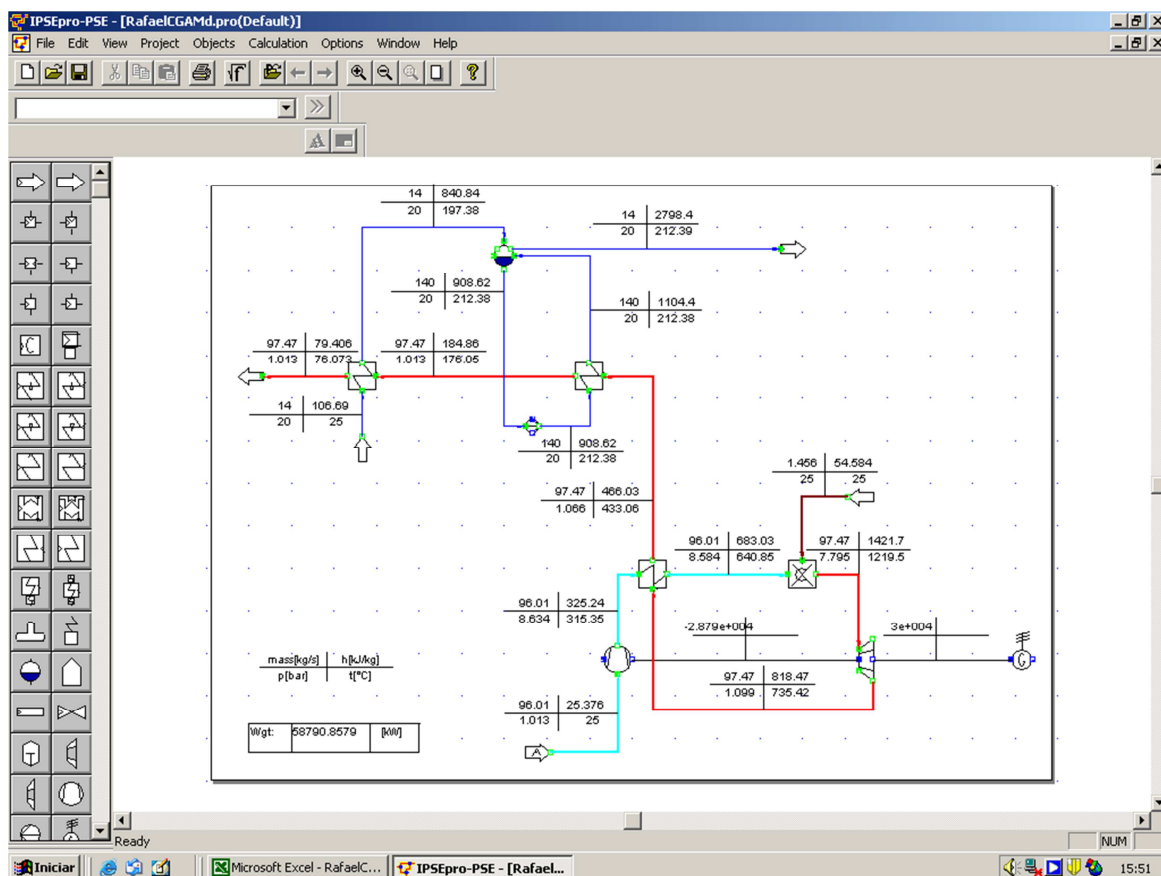


Figura 6.2 – Resultado da simulação usando o ponto ótimo encontrado pela referência (CGAM)

Para contornar este problema, o valor da temperatura de entrada da câmara de combustão (T_3) foi “solto” e, em seu, lugar o valor da diferença de temperatura na saída do evaporador foi fixada em 1 °C. Dessa forma não houve problema de falta de convergência dos cálculos e o problema foi resolvido. O simulador retornou o valor de 606,39 °C para a temperatura “ T_3 ”. Esse valor será usado como limite superior da temperatura de entrada na câmara de combustão para os cálculos de otimização posteriormente.

6.2. RESULTADO DA SIMULAÇÃO

Foi simulado o sistema novamente utilizando a temperatura T_3 encontrada (606 °C). O resultado obtido das temperaturas e pressões das correntes de fluxo pode ser

visto na Tabela 6.2. Na Tabela 6.3 pode-se ver o resultado obtido em VALERO, *et al.*,1994, na resolução do problema CGAM.

Tabela 6.2 – Resultado obtido através da simulação do sistema CGAM no IPSEpro

Fluxo	T (°C)	P (bar)
1	25	1,013
2	315	8,634
3	606	8,584
4	1219,5	7,795
5	736,06	1,099
6	468,91	1,066
7	114,35	1,013
8	25	20
9	212,39	20

Tabela 6.3 – Resultado obtido na solução convencional do problema CGAM

Fluxo	T (°C)	P (bar)
1	25	1,013
2	322,36	8,634
3	640,85	8,202
4	1219,5	7,792
5	714,75	1,099
6	445,61	1,066
7	127,11	1,013
8	25	20
9	212,39	20

Comparando essas duas tabelas é possível perceber algumas divergências, ainda que pequenas, em virtude de alguns fatores. O primeiro fator a contribuir com as diferenças nos resultados é, sem dúvidas, a modelagem. Como já visto no Capítulo 2, a modelagem depende do grau de detalhamento que o projetista quer no processo. A modelagem física utilizada no simulador, ainda que respeite de forma adequada a realidade, não é exatamente igual à modelagem física proposta no problema CGAM. Além disso, na modelagem termodinâmica do trabalho de referência (VALERO, *et al.*,1994), os gases são aproximados como gases ideais, e

as equações são desenvolvidas a partir dessa hipótese. Já o IPSE trata os gases como misturas de gases, cada uma com suas próprias características.

Outro fator que pode ter gerado diferenças nos resultados é o fato de que as quedas de pressão no modelo de referência são relativas, enquanto que no modelo do IPSE, essas quedas são dadas de forma absoluta.

Sem dúvidas, a maior diferença de temperatura ocorre no fluxo 3. Isso porque essa temperatura teve que ser ajustada para possibilitar a convergência dos resultados como já explicado. Fora isso, os resultados obtidos pela simulação ficaram bem próximos do esperado com um desvio percentual máximo de 5,2 % para a temperatura 6.

7. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA CGAM UTILIZANDO O IPSEpro

Neste capítulo são apresentados os procedimentos utilizados para a otimização, tais como escolha para os valores iniciais, escolha dos limites que delimitam a região viável de busca, bem como os resultados obtidos pela aplicação do método dos poliedros flexíveis ao problema de otimização do sistema CGAM.

Primeiramente, o problema será resolvido para um dado ponto inicial e os valores das variáveis, bem como o valor da função objetivo, comparados com os valores encontrados na referência (VALERO, *et al.*,1994). Esse será denominado caso 1.

Posteriormente, será discutido como o método se comporta ao escolher outro ponto inicial e a possibilidade de trabalhar com custos menores de um equipamento específico mudando os limites das variáveis de decisão. Esse será o caso 2.

7.1. FUNÇÃO OBJETIVO DO SISTEMA CGAM

O problema de otimização consiste em minimizar o custo total de operação da planta de cogeração assumindo taxa fixa de produção de eletricidade e vapor. Logo o problema de otimização pode ser expresso como a minimização da função objetivo FO que é igual ao custo total por unidade de tempo $\dot{C}_T$ que se encontra no modelo econômico proposto em VALERO, *et al.*,1994, apresentado na seção 5.3 do Capítulo 5.

Então a função a ser minimizada é dada por

$$\dot{C}_T = c_c \dot{m}_c PCI + \dot{Z}_C + \dot{Z}_{PA} + \dot{Z}_{CC} + \dot{Z}_T + \dot{Z}_{CRC}$$

e está sujeita às constantes impostas pela modelagem da instalação.

7.2. VALORES INICIAIS E LIMITES DE BUSCA PARA O CASO 1

O algoritmo de otimização, implementado em Visual Basic no Excel, trabalha de forma iterativa, sendo o número de iterações adotado neste trabalho igual a 35, e o limite de tolerância entre uma iteração e outra igual a 0,0001. Esses valores se mostram bem aceitáveis tendo em vista que o método tende a convergir os valores em um tempo pequeno.

Para uma primeira busca foi escolhido um ponto inicial bem próximo daquele encontrado na referência. A Tabela 7.1 mostra os valores iniciais das variáveis de decisão a serem usadas.

Tabela 7.1 – Valores iniciais das variáveis de decisão para o caso 1

Variáveis	Valor
P_1/P_2	8,00
η_c	0,75
T_3	550,00 °C
η_T	0,75
T_4	1300,00 °C

Os limites de busca das variáveis são mostrados na Tabela 7.2

Tabela 7.2 – Limites de tolerância das variáveis de decisão para o caso 1

Variáveis	Limite Mínimo	Limite Máximo
P_1/P_2	6,00	12,00
η_c	0	0,88
T_3	500,00 °C	600,00 °C
η_T	0	0,88
T_4	1200,00 °C	1400,00 °C

Os valores para esses limites foram estabelecidos depois de algumas tentativas de “rodar” o simulador e este apresentar erros. Isso acontece em virtude

de valores incoerentes, antes fora desses limites estabelecidos, que impedia o simulador de convergir as soluções e calcular determinadas propriedades.

O problema mais comum ocorreu nos trocadores de calor, tanto da caldeira quanto no pré-aquecedor. Alguns valores de temperaturas não eram condizentes com a realidade dos trocadores de calor, por exemplo, o fato de que as diferenças de temperatura da corrente quente e da corrente fria devem ser sempre positivas. Como o simulador não tem a propriedade de corrigir automaticamente esse problema, ele emite uma mensagem de erro e interrompe os cálculos da simulação.

Além desse problema na simulação, há também um fator limitante dos rendimentos isentrópicos. Tais rendimentos não podem ter um valor de 0,9 no decorrer do processo iterativo. Isso acontece porque o modelo econômico implementado possui duas equações em que se têm no denominador uma subtração da forma “ $0,9 - \eta_c$ ”.

São essas equações:

- Compressor: $Z_c = \left(\frac{c_{11}\dot{m}_a}{0,9 - \eta_c} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$
- Turbina: $Z_T = \left(\frac{c_{31}\dot{m}_g}{0,9 - \eta_T} \right) \ln \left(\frac{P_4}{P_5} \right) [1 + EXP(C_{33}T_4 - C_{34})]$

Logo, é conveniente estabelecer um limite abaixo de 0,9 para que o valor dessas variáveis não atinja em nenhum momento 0,9, o que ocasionaria uma divisão por zero.

7.3. RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO PARA O CASO 1

Para os valores iniciais descritos na seção 7.2, o resultado para o ponto ótimo do processo de otimização se encontra na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Ponto ótimo obtido no caso 1

P_1/P_2	9,34
η_c	0,853
T_3	563,44 °C
η_T	0,875
T_4	1200,00 °C

As Tabelas 7.4 e 7.5 representam, respectivamente, os valores finais das temperaturas e pressões nos fluxos, e os valores dos custos de investimento e aquisição de equipamentos.

Tabela 7.4 – Resultado obtido através da otimização do caso 1

Fluxo	T (°C)	P (bar)
1	25	1,013
2	329,3491503	9,4573
3	563,445	9,4073
4	1200,03	8,6186
5	704,8230045	1,099
6	490,4921653	1,066
7	139,4359415	1,013
8	25	20
9	212,3858013	20

Tabela 7.5 – Custos obtidos através da otimização do caso 1

Custo total por unidade de tempo	0,3480 \$/s
Custo do combustível por unidade de tempo	0,3174 \$/s
Custo de investimento por unidade de tempo	0,0306 \$/s
Custo de aquisição da câmara de combustão	66.107,38 \$
Custo de aquisição do compressor	1.679.833,15 \$
Custo de aquisição da turbina	1.492.010,95 \$
Custo de aquisição do pré-aquecedor	541.866,59 \$
Custo de aquisição da caldeira	791.562,59 \$

O resultado de todo o processo iterativo com os valores encontrados a cada iteração pode ser vista no Anexo A. Tais resultados são aqui mostrados em forma de gráficos.

A Figura 7.1 mostra graficamente como se deu a evolução da solução no decorrer da simulação junto à otimização. Nele estão representados a função objetivo (custo total por unidade de tempo), o custo de combustível por unidade de tempo e o custo de investimento por unidade de tempo.

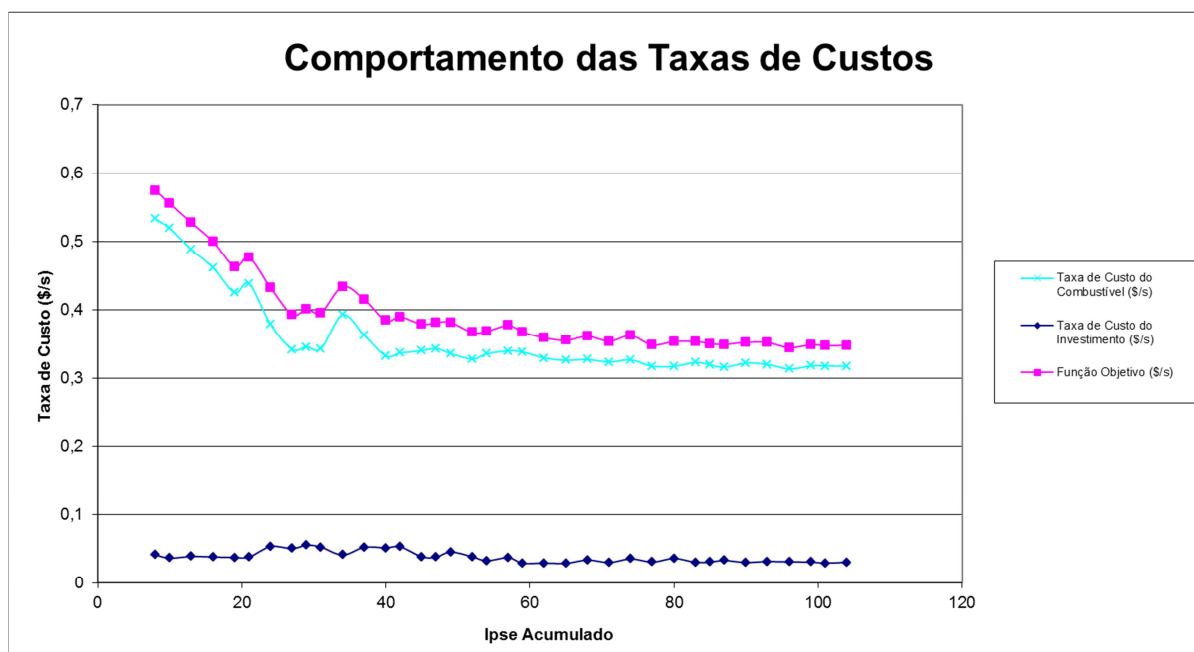


Figura 7.1 – Comportamento das taxas de custos no caso 1

Observando a Tabela 7.5 e a Figura 7.1, claramente se percebe que a taxa de custo de investimento representa uma pequena parcela da função objetivo, sendo que o custo de combustível por unidade de tempo é responsável pela maior parte do custo total.

O eixo das abscissas representa o número de vezes que o simulador é chamado. Dessa forma é possível medir o esforço computacional, denominado Ipse Acumulado, uma vez que, de acordo com a Figura 4.1, a cada processo iterativo do algoritmo de otimização o simulador recalcula o sistema de equações dispendendo tempo computacional.

Na Figura 7.2 pode-se observar o comportamento das variáveis de decisão no decorrer da simulação. Os valores no gráfico estão adimensionalizados. Isso foi feito para que todas as cinco variáveis de decisão tivessem a mesma dimensão para serem plotadas no mesmo gráfico e conseqüentemente comparadas uma com as outras. Essa adimensionalização foi feita da seguinte forma:

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (7.1)$$

onde

x' é o valor da variável adimensionalizada, x é o valor da variável, x_{min} e x_{max} são os valores dos limites mínimo e máximo pré-estabelecido.

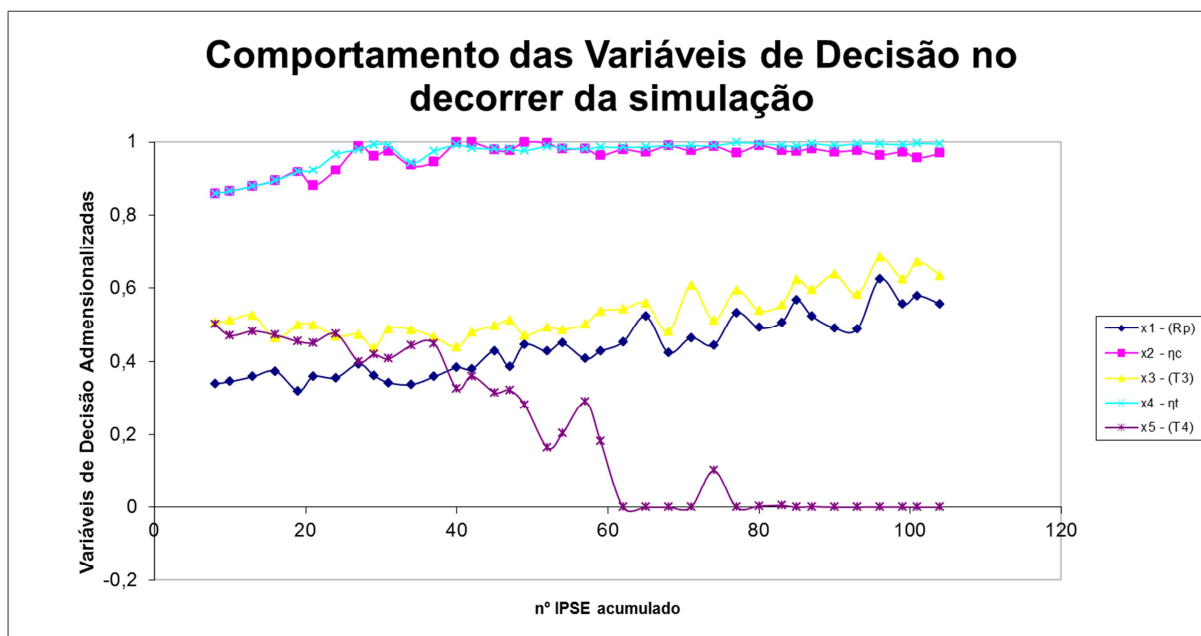


Figura 7.2 – Comportamento das variáveis de decisão no caso 1

Neste gráfico, observa-se uma tendência dos rendimentos isentrópicos de sempre buscar o maior valor possível. Isso não é bom porque “encarece” o compressor e a turbina, uma vez que, esses dois equipamentos possuem modelos econômicos no qual o custo de aquisição é aumentado com o aumento dos rendimentos. Em outras palavras, quanto melhor o equipamento (melhor rendimento), mais caro ele é, naturalmente.

A Figura 7.3 mostra os resultados obtidos para os custos do decorrer do processo iterativo. Nele é possível observar que, para o ponto inicial, a turbina apresenta um valor de aquisição muito alto, cerca de \$4.000.000,00. Entretanto, o algoritmo buscando valores ótimos para as variáveis diminui o custo desse equipamento consideravelmente ficando este perto do custo de aquisição do compressor. Este aumenta um pouco devido ao aumento da relação de pressão no decorrer dos cálculos.

A Figura 7.4 mostra o sistema CGAM otimizado para o caso 1.

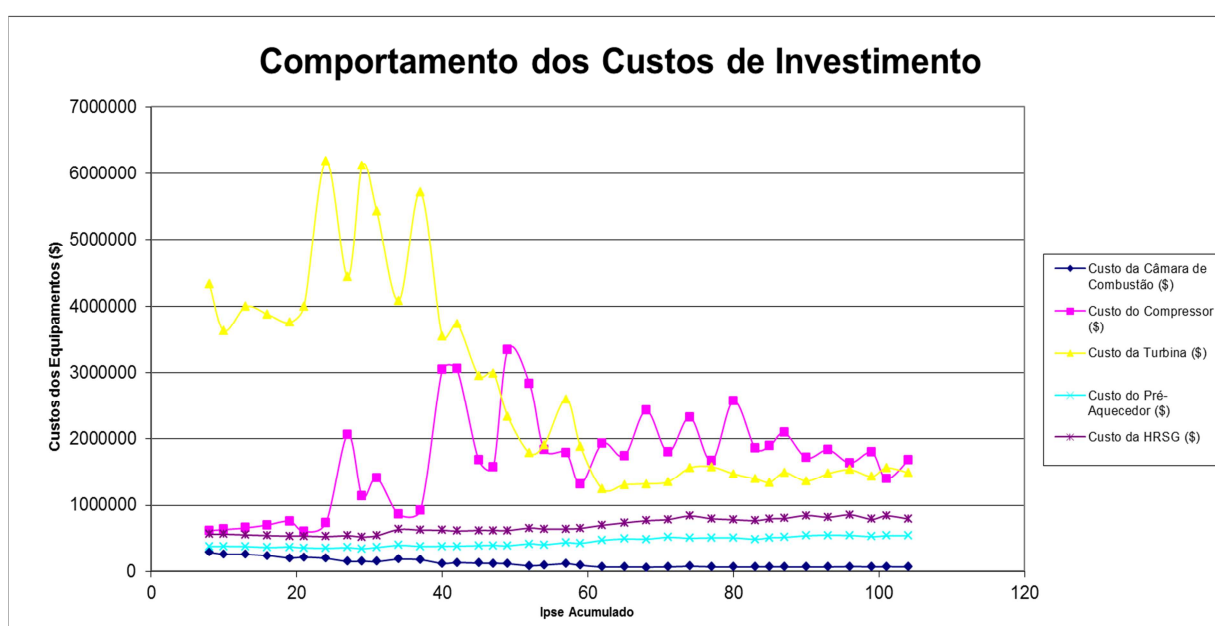


Figura 7.3 – Comportamento dos custos de investimento no caso 1

7.4. COMPARAÇÃO DO RESULTADO DO CASO 1 COM O RESULTADO OBTIDO PELOS AUTORES DO PROBLEMA CGAM

A Tabela 7.6 mostra os resultados das propriedades temperatura e pressão das correntes de fluxo obtidos pela otimização através do método dos poliedros flexíveis e pelo problema de referência (VALERO, *et al.*, 1994).

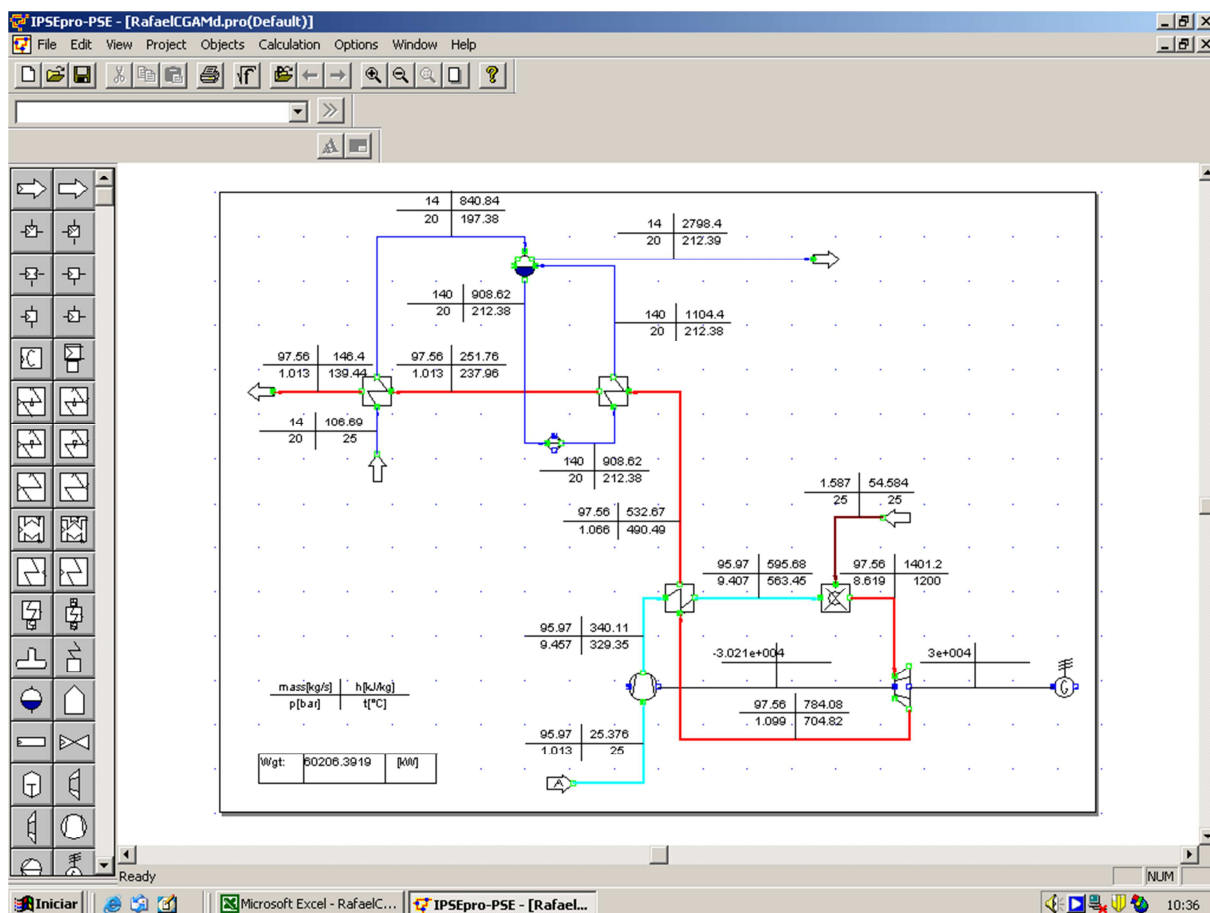


Figura 7.4 – Sistema otimizado para o caso 1

Tabela 7.6 – Comparação entre os resultados obtidos pelo método dos poliedros flexíveis e em VALERO, et al.,1994,

Fluxo	Resultado obtido em VALERO, et al.,1994,		Resultado obtido neste trabalho		Diferença percentual	
	T (°C)	P (bar)	T (°C)	P (bar)	T (%)	P (%)
1	25	1,013	25	1,013	0	0
2	322,36	8,634	329,3491503	9,4573	2,17	9,53
3	640,85	8,202	563,445	9,4073	12,08	14,70
4	1219,5	7,792	1200,03	8,6186	1,60	10,61
5	714,75	1,099	704,8230045	1,099	1,40	0
6	445,61	1,066	490,4921653	1,066	10,07	0
7	127,11	1,013	139,4359415	1,013	9,70	0
8	25	20	25	20	0	0
9	212,39	20	212,3858013	20	0	0

As diferenças encontradas se devem a alguns fatores, entre eles, àqueles citados no Capítulo 6, tais como diferença nas modelagens e nas quedas de pressões.

Há também o fato de que o método usado na otimização neste trabalho não é igual ao método utilizado pelos autores do problema CGAM. Isso, sem dúvida contribui para as divergências que, de forma geral, não foram tão grandes com exceção apenas da temperatura e pressão para o fluxo 3.

A Tabela 7.7 mostra a diferença entre os custos obtidos no ponto ótimo encontrado pelo método dos poliedros flexíveis e os custos referentes ao Problema CGAM.

Tabela 7.7 – Comparação entre os custos

Custos	Poliedros Flexíveis	VALERO, et al.,1994,
Custo total por unidade de tempo	0,3480 \$/s	0,3620 \$/s
Custo do combustível por unidade de tempo	0,3174 \$/s	0,3255 \$/s
Custo de investimento por unidade de tempo	0,0306 \$/s	0,03652 \$/s
Custo de aquisição da câmara de combustão	66.107,38 \$	146.900 \$
Custo de aquisição do compressor	1.679.833,15 \$	1.348.000 \$
Custo de aquisição da turbina	1.492.010,95 \$	1.927.000 \$
Custo de aquisição do pré-aquecedor	541.866,59 \$	827.700 \$
Custo de aquisição da caldeira	791.562,59 \$	1.202.000 \$

É possível perceber através dessa tabela que, com exceção do compressor, todos os equipamentos obtiveram custos mais baixos de aquisição. A função objetivo em si (custo total por unidade de tempo) foi minimizada ainda mais no presente trabalho.

O valor mais alto do compressor se deve ao fato de que a relação de pressão no mesmo ficou um pouco mais alta do que no trabalho de referência. Isso é perceptível já que no modelo econômico observa-se que o valor do custo de aquisição para este equipamento é diretamente proporcional à sua relação de pressão.

Na próxima seção, far-se-á uma outra otimização buscando a redução dos custos da turbina e do compressor. Para isso o ponto inicial mudará e, às variáveis que “encarecem” tais equipamentos, serão postos limites máximos menores do que aqueles utilizados anteriormente.

7.5. VALORES INICIAIS PARA O CASO 2

Os objetivos aqui são:

- Avaliar como se dá o progresso de cálculo com outros valores para o ponto inicial;
- Tentar diminuir os custos de investimento da turbina e do compressor.

Olhando para as equações do modelo econômico da turbina e do compressor (ver seção 5. 3) observa-se que ambos os valores dos custos de aquisição crescem a medida que os respectivos rendimentos isentrópicos aumentam. Sendo assim, parte-se do pressuposto que, se forem limitados os rendimentos isentrópicos em valores mais baixos, os respectivos custos de aquisição irão diminuir. Os valores para o ponto inicial se encontram na Tabela 7.8. Os limites podem ser vistos na Tabela 7.9.

Tabela 7.8 – Valores iniciais para as variáveis de decisão no caso 2

Variáveis	Valor
P_1/P_2	5
η_c	0,70
T_3	450,00 °C
η_T	0,70
T_4	1000,00 °C

Tabela 7.9 – Limites de tolerância das variáveis de decisão para o caso 2

Variáveis	Limite Mínimo	Limite Máximo
P_1/P_2	5,00	15,00
η_c	0	0,75
T_3	400,00 °C	600,00 °C
η_T	0	0,75
T_4	700,00 °C	1400,00 °C

7.6. RESULTADO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO PARA O CASO 2

O resultado do processo de otimização é mostrado na Figura 7.5.

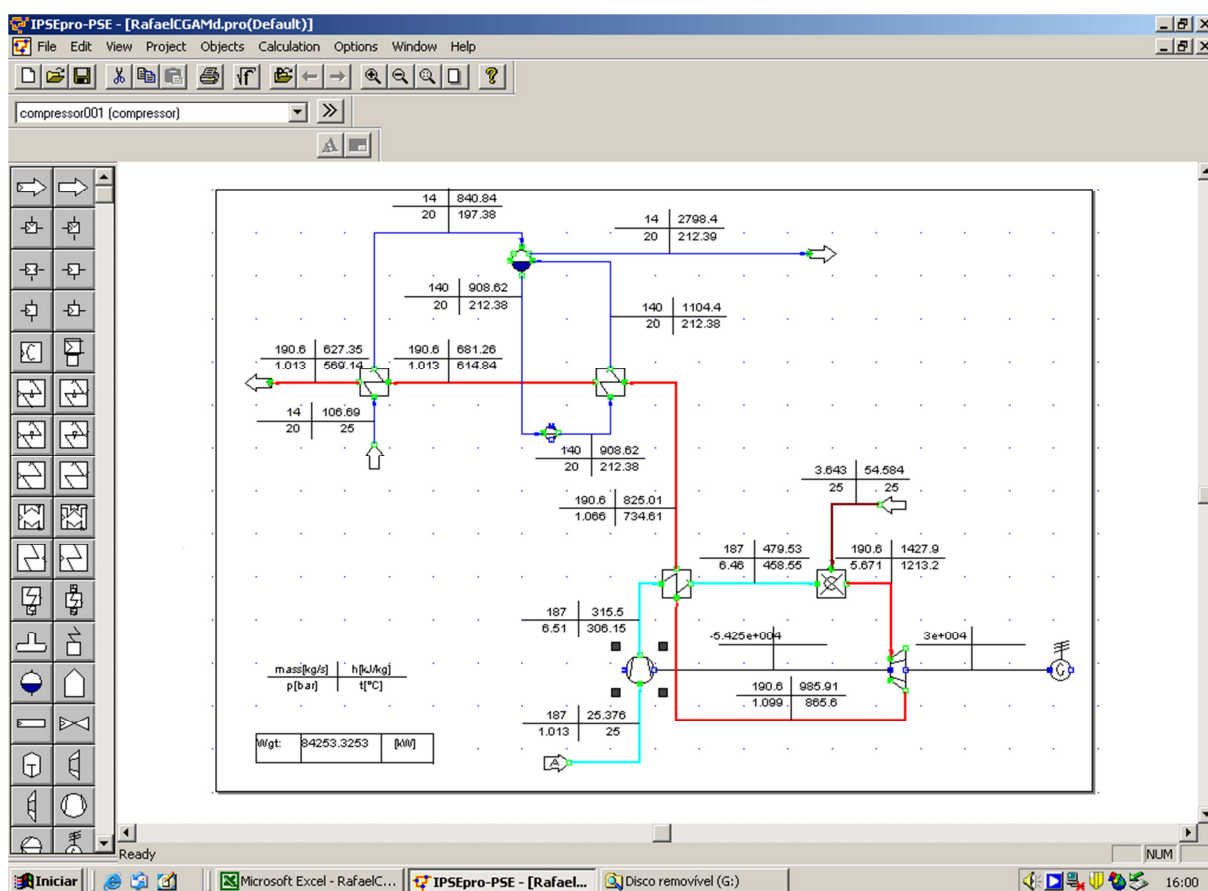


Figura 7.5 – Sistema otimizado para o caso 2

O ponto ótimo encontrado se encontra na Tabela 7.10. É possível perceber que este ponto não se encontra próximo do ponto ótimo encontrado no caso 1.

Tabela 7.10 – Ponto ótimo encontrado para o caso 2

Variáveis	Valor
P_1/P_2	6,43
η_c	0,7276
T_3	458,54 °C
η_T	0,7416
T_4	1213,20 °C

Na Tabela 7.11 são mostrados os valores para os custos obtidos para o caso 2 e para o caso 1.

Tabela 7.11 – comparação entre custos obtidos nos casos 1 e 2

Custo	Caso 1	Caso 2
Custo total por unidade de tempo	0,3480 \$/s	0,7435 \$/s
Custo do combustível por unidade de tempo	0,3174 \$/s	0,7285 \$/s
Custo de investimento por unidade de tempo	0,0306 \$/s	0,015 \$/s
Custo de aquisição da câmara de combustão	66.107,38 \$	98.993,44 \$
Custo de aquisição do compressor	1.679.833,15 \$	512.527,43 \$
Custo de aquisição da turbina	1.492.010,95 \$	657.654,32 \$
Custo de aquisição do pré-aquecedor	541.866,59 \$	313.554,29 \$
Custo de aquisição da caldeira	791.562,59 \$	649.873,63 \$

Olhando a tabela acima, se pode perceber que, com exceção da câmara de combustão, todos os equipamentos tiveram seus custos de aquisição reduzidos implicando assim na redução do custo de investimento por unidade de tempo. Entretanto, considerando o valor da função objetivo, constata-se que esta aumentou em mais de 200%. Ou seja, o problema não está otimizado tendo seu custo muito

alto causado principalmente pelo taxa de custo do combustível. Esse alto valor do custo de combustível por unidade de tempo pode ser explicado pelos seguintes fatores:

- A vazão de combustível calculada pelo simulador no caso 2 é cerca de duas vezes maior do que no caso 1. Esse valor de vazões pode ser vistos nas Figuras 7.4 e 7.5.
- Baixa temperatura na entrada da câmara de combustão (T_3). Como pode ser visto, esse valor para o caso 2 é cerca de 100 °C menor do que o valor encontrado no caso 1. Isso implica uma maior energia demandada na para promover a combustão na câmara e elevar a temperatura T_4 no valor desejado.

É importante ressaltar que, para o caso 2, também foi utilizado o número máximo de 35 iterações. O processo foi recalculado com 100 iterações, entretanto a função objetivo muito pouco alterou seu valor, isso pode dizer duas coisa:

- O método é falho e não conseguiu encontrar a solução ótima para um ponto inicial “longe” do previsto.
- A função objetivo apresentada na seção 7.1 é multimodal, podendo método dos poliedros flexíveis ter o encontrado um valor de mínimo local.

As Figuras 7.6 a 7.8 mostram o progresso de cálculo das variáveis de decisão, dos custos de aquisição e dos custos por unidade de tempo respectivamente.

No gráfico da Figura 7.6, a diferença a ser notada é que a temperatura T_4 aumentou seu valor no progresso dos cálculos, enquanto que no caso 1, teve seu valor diminuído. Isso foi devido ao chute inicial. Seu valor final foi praticamente o mesmo no final da simulação.

A Figura 7.7 mostra graficamente o que já foi mencionado. O método otimizou os custos de aquisição, o que foi possível pela limitação dos limites superiores para o rendimento isentrópico. O salto no cálculo do custo da turbina observado no final do processo iterativo se deve ao aumento momentâneo da relação P_4/P_5 . No modelo

econômico da turbina, percebe-se que o custo é proporcional ao logaritmo dessa relação.

Na Figura 7.8 observa-se que o custo total por unidade de tempo é quase que na sua totalidade composto pelo custo de combustível por unidade de tempo, o permite concluir que o combustível é a principal fonte de despesa em uma planta de potência.

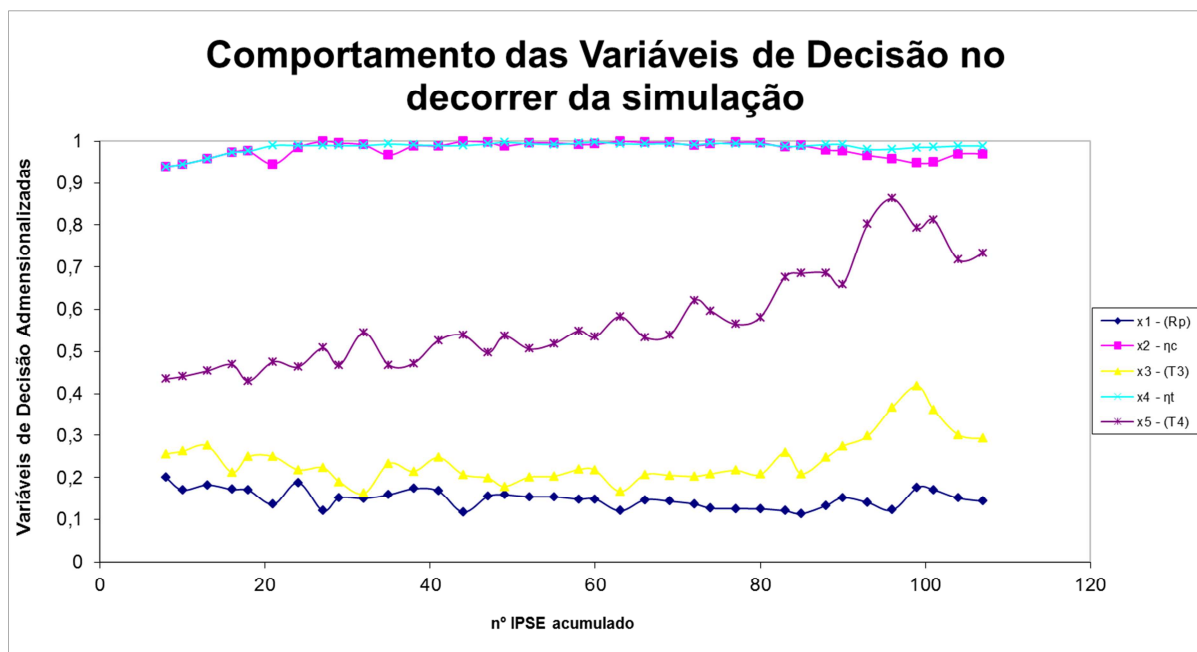


Figura 7.6 – Comportamento das variáveis de decisão no caso 2

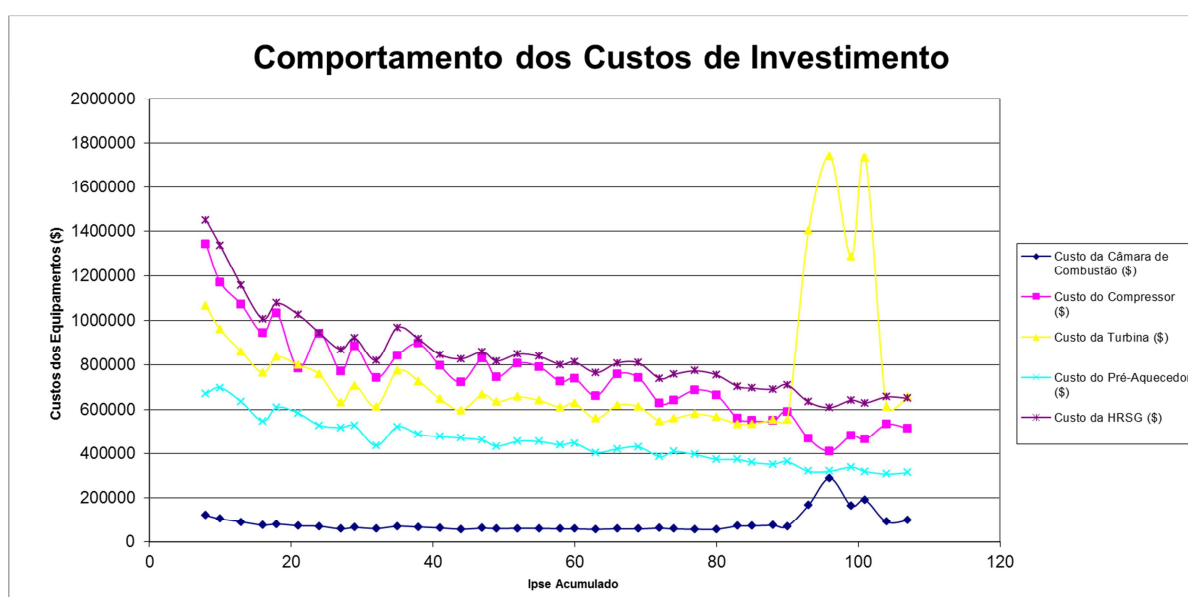


Figura 7.7 – Comportamento dos custos de investimento no caso 2

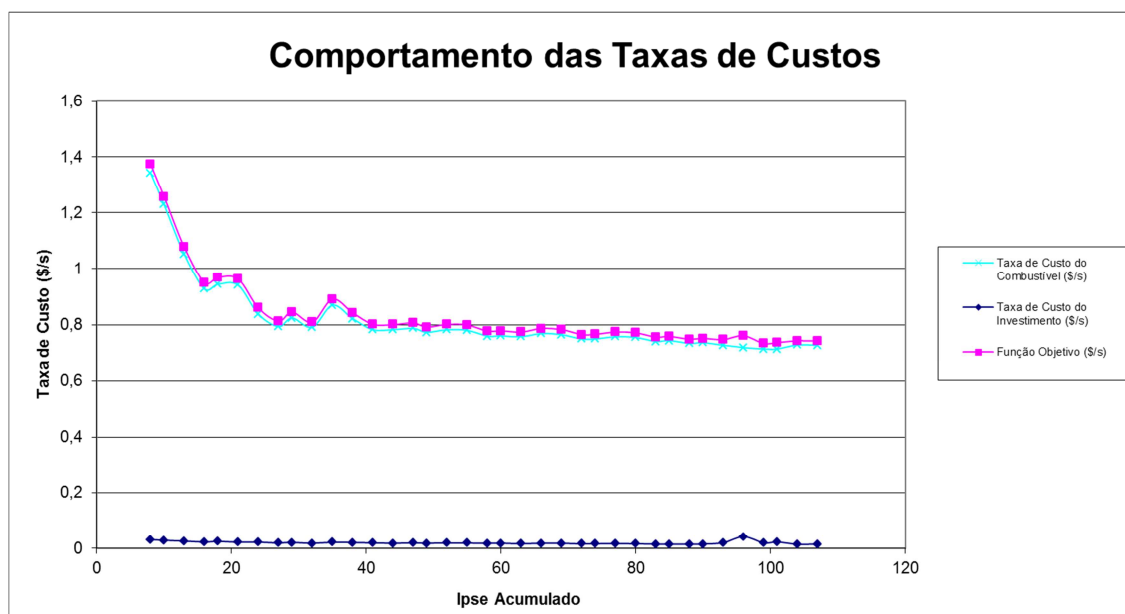


Figura 7.8 – Comportamento das taxas de custos no caso 2

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

As metas deste trabalho foram estudar o comportamento do simulador de processos IPSEpro, sua modelagem e a maneira que ele resolve um sistema de equações de um determinado modelo, testar um método de otimização matemática em sistema de cogeração e analisar os resultados.

Diante dessas metas pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Quanto ao comportamento do simulador, é importante ressaltar a dificuldade que se teve no início do trabalho com o programa. Problemas de não-convergência, bem como erros de cálculos e resultados irreais foram constantes. Embora o IPSEpro tenha restrições de desigualdade em sua modelagem para prevenir resultados irreais, tais resultados apareciam eventualmente. Problemas de não convergência nos trocadores de calor, como aqueles mencionados no Capítulo 6, foram os principais responsáveis pelos limites apertados impostos às variáveis de decisão durante a otimização matemática. Estes problemas foram contornados analisando cada componente e seu respectivo modelo físico no simulado, observando como as variáveis se comportam na simulação.
- À respeito do método de otimização, esse cumpriu o objetivo deste trabalho reduzindo a função objetivo para valores adequados e próximos com aqueles encontrados em VALERO, *et al.*,1994. É importante ressaltar que para se ter uma melhor conclusão sobre o eficiência do método dos poliedros flexíveis aplicados a este tipo de problema, dever ser feito um trabalho com outro método para posterior comparação. De forma geral, o método utilizado possibilitou a observação de como se comportam as propriedades no decorrer do processo iterativo, bem como gerar curvas de como os custos se comportam quando se muda as variáveis de decisão.

- Na comparação com os resultados do sistema de referência, o CGAM, pode-se observar que os resultados obtidos neste trabalho foram bem satisfatórios e ficaram bem próximos daqueles encontrados pelos autores da referência quando se usou um ponto inicial já próximo dos valores previstos. Entretanto, quando se usou valores afastados desse ponto ótimo, a função objetivo não teve seu valor tão reduzido. Como já mencionado no Capítulo 7, e aqui lembrado, esse fato pode ter sido causado pela ineficiência do método em convergir valores afastados do mínimo e/ou ter encontrado um ponto de mínimo local, dado que a função objetivo é multimodal.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Um estudo mais detalhado da modelagem matemática do simulador de processos IPSEpro e um estudo da otimização do sistema utilizando um outro método de otimização, como por exemplo o método de HOOKE & JEEVES (1966) descrito no Anexo B deste trabalho.
- Aplicar o mesmo método de otimização sem usar um simulador, usando o mesmo modelo físico e o mesmo modelo termodinâmico do CGAM.
- Aplicar a termoeconomia para alocação de custos na condição de ótimo obtendo o custo da potência e do vapor.

REFERÊNCIAS

BEJAN, A., TSATSARONIS, G. e MORAN, M., 1996, ***Thermal design and optimization***, John Wiley & Sons, New York, EUA.

CORDEIRO, A. S., 2007, **Otimização e Melhoramento Exergoeconômico de Sistemas Térmicos Modelados em um Simulador de Processos Utilizando Métodos de Busca Direta e Estocástico**, Dissertação de mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro.

DONATELLI, J. L., 2002, **Otimização Estrutural e Paramétrica de Sistemas de Cogeração Utilizando Superestruturas**, Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro.

HOOKE, R. e JEEVES, T. A., 1966, ***“Direct Search of Numerical and Statistical Problems”***, J. ACM, v. 8, pp. 212-229.

MACHIO, C., SANTOS, A. A. e SCHIOZER, D. J., 2006, **Aplicação do Método Simplex no Processo de Ajuste de Histórico Assistido**, Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006, UNICAMP, São Paulo.

NELDER, J. A. e MEAD, R., 1965, ***A Simplex Method for Function Minimization***, Computer Journal, v. 7, pp. 308-313.

PERLINGEIRO, C. A. G., 2005, **Análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**, Blucher, São Paulo.

SILVA, L. C., 2005, **Simulação de Processos**, UFES, Campus Alegre, Alegre.

SIMTECH, 2000, ***IPSEpro User Documentation – Version 3.1***, Simtech Simulations Technology, Austria.

VALERO, A., LOZANO, M. A. e SERRA, L., et al., 1994, ***“CGAM Problem: Definition and Conventional Solution”***, Energy, The International Journal, Special Issue: Invited Papers on Exergoeconomics, Guest Editor: George Tsatsaronis, v. 19, pp. 279-286.

ANEXO A – RESULTADOS DE CADA ITERAÇÃO DURANTE O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA

Caso 1

Tabela A.1 – iterações no caso 1

Iteração	x1 - (Rp)	x2 - η_c	x3 - (T3)	x4 - η_t	x5 - (T4)	Função Objetivo (\$/s)	n° IPSE	n° IPSE acumulado
0	8,036	0,75528	550,6	0,75528	1300	0,574941073	8	8
1	8,072	0,76056	551,2	0,76056	1294	0,555878778	2	10
2	8,1512	0,772176	552,52	0,772176	1296,4	0,527561279	3	13
3	8,24192	0,785482	546,232	0,785482	1294,24	0,50016983	3	16
4	7,919072	0,806771	549,9712	0,806771	1290,784	0,463045183	3	19
5	8,153677	0,773595	549,9693	0,810555	1290,17	0,476515353	2	21
6	8,135521	0,811694	546,8155	0,84971	1294,956	0,432409243	3	24
7	8,360834	0,86983	547,3048	0,862016	1279,93	0,392959562	3	27
8	8,17321	0,846773	543,5971	0,873637	1283,632	0,401294221	2	29
9	8,055006	0,857984	548,8311	0,8712	1281,549	0,395935951	2	31
10	8,0239	0,82269	548,6376	0,829719	1288,477	0,433875204	3	34
11	8,150596	0,832475	546,5265	0,857631	1289,702	0,415434251	3	37
12	8,29897	0,88	543,8724	0,872549	1265,216	0,384377397	3	40
13	8,277202	0,88	547,7966	0,865629	1272,081	0,389840518	2	42
14	8,572111	0,860688	549,7081	0,863156	1263,175	0,378797462	3	45
15	8,318209	0,859401	551,1679	0,86262	1264,362	0,381698043	2	47
16	8,675925	0,88	547,1088	0,859188	1256,357	0,381546987	2	49
17	8,563783	0,876393	549,1828	0,869854	1232,854	0,366899516	3	52
18	8,694397	0,862593	548,6194	0,865318	1240,704	0,368416645	2	54
19	8,441547	0,863608	550,1627	0,863324	1257,926	0,377393193	3	57
20	8,56513	0,847565	553,7374	0,867675	1236,613	0,367578291	2	59
21	8,713172	0,862096	554,2706	0,866693	1200	0,359094256	3	62
22	9,137274	0,85535	555,8262	0,86838	1200	0,355426792	3	65
23	8,542654	0,871138	548,097	0,8712	1200	0,361343828	3	68
24	8,782043	0,859238	560,6985	0,8712	1200	0,353999875	3	71
25	8,662467	0,870213	551,2078	0,870944	1220,343	0,362287694	3	74
26	9,194556	0,853837	559,41	0,878141	1200	0,348593666	3	77
27	8,94664	0,871551	553,8489	0,876014	1200,63	0,353570067	3	80
28	9,037814	0,859257	555,4943	0,87225	1200,946	0,353684619	3	83
29	9,397649	0,857675	562,2256	0,869615	1200	0,350563917	2	85
30	9,142472	0,863754	559,6359	0,875973	1200,315	0,349265663	2	87
31	8,942403	0,856087	563,7378	0,8712	1200	0,352446616	3	90
32	8,926626	0,859616	558,2353	0,875618	1200,032	0,351935401	3	93
33	9,748849	0,848905	568,3699	0,875531	1200,126	0,344654313	3	96
34	9,334294	0,855984	562,5339	0,873194	1200,044	0,34891598	3	99
35	9,476137	0,841722	567,208	0,87646	1200	0,347470094	2	101
36	9,335984	0,852935	563,4453	0,875032	1200,035	0,348033336	3	104

Caso 2**Tabela A.2 – iterações no caso 2**

Iteração	x1 - (Rp)	x2 - ηc	x3 - (T3)	x4 - ηt	x5 - (T4)	Função Objetivo (\$/s)	n° IPSE	n° IPSE acumulado
0	7	0,7045	451,2	0,7045	1004,2	1,374512963	8	8
1	6,7	0,709	452,4	0,709	1008,4	1,258036319	2	10
2	6,82	0,7189	455,04	0,7189	1017,64	1,077634039	3	13
3	6,712	0,73024	442,464	0,73024	1028,224	0,950425903	3	16
4	6,6928	0,732256	449,9616	0,732256	1000,706	0,968175983	2	18
5	6,35488	0,709238	449,9194	0,7425	1032,982	0,962735519	3	21
6	6,876832	0,739033	443,6471	0,7425	1024,334	0,860248218	3	24
7	6,202931	0,75	444,6354	0,7425	1055,735	0,81365136	3	27
8	6,508069	0,747175	437,937	0,7425	1027,323	0,845793342	2	29
9	6,495665	0,743552	432,3276	0,7425	1082,005	0,809817035	3	32
10	6,583442	0,725794	446,5891	0,745102	1027,565	0,891327406	3	35
11	6,728099	0,741678	442,8449	0,743507	1030,345	0,84324158	3	38
12	6,673049	0,741901	449,508	0,7425	1068,721	0,802585949	3	41
13	6,166964	0,75	441,3759	0,7425	1077,423	0,801388584	3	44
14	6,545379	0,748339	439,7123	0,745423	1047,959	0,807265476	3	47
15	6,582513	0,741788	435,693	0,748267	1076,044	0,792573132	2	49
16	6,537587	0,747317	440,134	0,745891	1054,394	0,802225303	3	52
17	6,533544	0,74714	440,5534	0,744502	1063,127	0,799920158	3	55
18	6,476626	0,744888	443,7333	0,746897	1084,757	0,778570006	3	58
19	6,478222	0,744974	443,3861	0,748908	1074,555	0,779531135	2	60
20	6,197638	0,75	433,2483	0,745952	1108,46	0,775214357	3	63
21	6,458006	0,74816	441,2456	0,745194	1073,93	0,78773547	3	66
22	6,425453	0,747877	440,9707	0,746101	1077,308	0,784007454	3	69
23	6,360718	0,742745	440,491	0,743977	1134,784	0,766545692	3	72
24	6,261143	0,745166	441,6522	0,746492	1117,846	0,767210038	2	74
25	6,251585	0,74828	443,3316	0,745782	1095,782	0,775375454	3	77
26	6,245055	0,747574	441,3925	0,745383	1107,37	0,772463698	3	80
27	6,198056	0,739487	451,8548	0,741083	1173,724	0,757342778	3	83
28	6,131699	0,742183	441,6934	0,741554	1179,601	0,759912886	2	85
29	6,328138	0,734765	449,4322	0,744268	1179,637	0,750233361	3	88
30	6,511477	0,732891	454,8761	0,743878	1161,079	0,752984525	2	90
31	6,395766	0,724911	459,704	0,735871	1261,604	0,748921123	3	93
32	6,217645	0,719051	473,5543	0,736038	1303,819	0,762269968	3	96
33	6,755866	0,711037	483,6534	0,739163	1254,909	0,734995008	3	99
34	6,704577	0,712735	472,2249	0,739663	1268,158	0,738149009	2	101
35	6,500707	0,727485	460,1928	0,741704	1201,718	0,744378831	3	104
36	6,426294	0,727694	458,547	0,741643	1213,205	0,743484038	3	107

ANEXO B – MÉTODO DE BUSCA DIRETA DE HOOKE & JEEVES

O método de Hooke & Jeeves utiliza um algoritmo de busca direta. Neste algoritmo, o espaço de soluções é formado pela discretização dos parâmetros de ajuste, sendo que cada parâmetro corresponde a um eixo desse espaço. Para cada parâmetro é atribuído um valor mínimo e um valor máximo e um número de intervalos. Na Figura B.1 é mostrada uma representação esquemática do algoritmo para dois parâmetros genéricos, formando um espaço de soluções bi-dimensional.

O procedimento do método Hooke & Jeeves é iterativo e se inicia com a seleção de um ponto base e com o cálculo da função objetivo neste ponto. Seguem-se duas fases que se alternam até o ponto ótimo: a exploração e a progressão.

Exploração

A exploração consiste em testar a função objetivo em pontos vizinhos à base, mediante incrementos selecionados, na direção de cada variável de busca e nos sentidos positivo e negativos de cada direção. A fase de exploração só é considerada concluída depois de testadas as duas direções. O resultado da exploração é a direção provável do ótimo que orientará a progressão. Se os incrementos já forem menores do que as tolerâncias a busca já pode ser encerrada e a base declarada o ponto ótimo.

Progressão

A progressão consiste em realizar um teste na direção provável do ótimo com o dobro dos incrementos da fase de exploração, como que, “apostando” na direção prevista. A progressão é repetida enquanto forem registrados “sucessos”. Ao primeiro “insucesso”, inicia-se um novo ciclo com uma exploração em torno da base vigente.

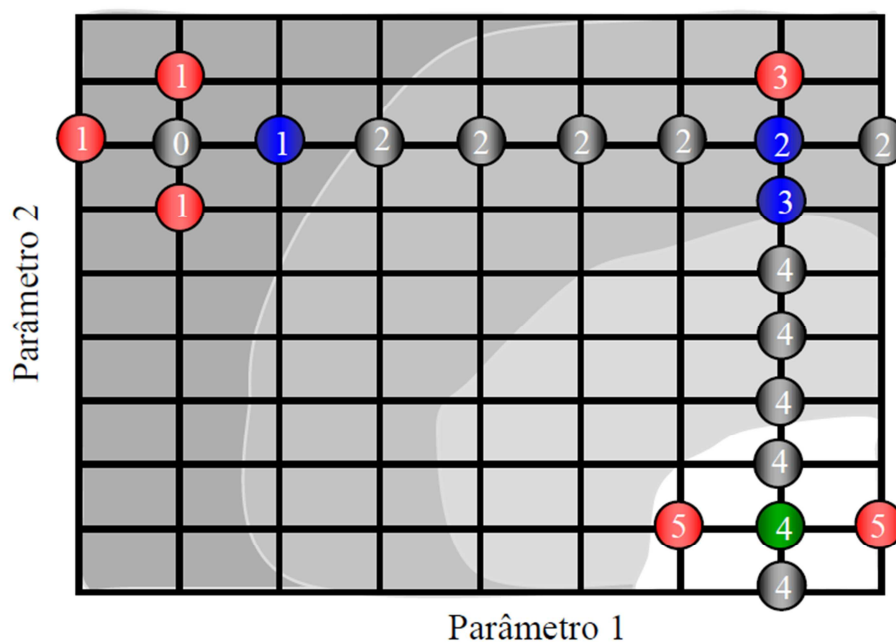


Figura B.1 - Descrição esquemática do algoritmo de Hooke & Jeeves (MASCHIO, *et. al.*,2006)

A primeira busca exploratória se dá em torno de um ponto inicial (ponto 0), sendo que o ponto de menor função objetivo (ponto 1 em azul) determina a direção da busca linear que ocorre em seguida. O ponto de menor FO (ponto 2 em azul) da primeira busca linear é o ponto em torno do qual uma nova busca exploratória é realizada. O algoritmo termina em uma busca exploratória quando os valores da FO nos pontos explorados forem todos maiores do que ponto em torno do qual ocorreu a busca exploratória. Na Figura B.1 o ponto de mínimo encontrado é o ponto 4 em verde.