

OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UMA USINA NUCLEAR DO TIPO
PWR

Nelbia da Silva Lapa

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph.D.

Prof. Aquilino Senra Martinez, D.Sc.

Prof. Su Jian, D.Sc.

Prof. Helcio Rangel Barreto Orlande, Ph.D.

Prof. Cláudio Márcio de Abreu Pereira, D.Sc.

Dr. Antônio César Ferreira Guimarães, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2005

LAPA, NELBIA DA SILVA

Um Modelo Dedicado para a Simulação do
Circuito Secundário de uma Usina Nuclear
Visando a Otimização da Eficiência Térmica
[Rio de Janeiro] 2005

VIII, 90 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia Nuclear, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Otimização da Eficiência Térmica

2. Balanço Térmico

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Este trabalho foi realizado com grande esforço e abdicção do convívio com pessoas muito importantes em minha vida. Assim sendo, é para essas pessoas que dedico o fruto obtido no final desta etapa.

*À minha amada filha, **Ana Elisa**, a qual chegou durante este trabalho e é meu grande amor. Sua existência, em alguns momentos, reduziu meu tempo de dedicação às atividades profissionais, mas também é a responsável pela conclusão do mesmo, pois nos momentos difíceis, nos quais pensei em desistir, sempre tive a preocupação em não deixar um exemplo de fracasso para a pessoa mais importante em minha vida.*

*Ao meu amado esposo, **Celso Marcelo**, que além da sua ajuda como profissional, também soube ser companheiro durante essa jornada. Sem sua presença, este objetivo seria dificilmente atingido.*

*Ao meu amado pai, **José Aureliano**, grande amigo incondicional em todos os momentos da minha vida, desde o início da minha existência. Sei que tudo fez, sem arrependimentos, para que eu pudesse estar realizando este trabalho.*

*À minha querida mãe, **Cremilda**, não há palavras que consigam traduzir a sua contribuição, desde meu primeiro choro até hoje, em tudo que já realizei, inclusive este trabalho.*

*À minha cara sogra, **Elisa Lapa**, a qual vem contradizer todas as versões populares da pessoa “sogra”. Sempre me apoiando, pude ter mais forças e tranqüilidade para o desenvolvimento deste trabalho.*

*Ao meu querido sogro, **Celso Guimarães Lapa** (in memorian), um dos meus maiores entusiastas. Tendo partido muito cedo, sua ausência muito me abate. Mas dada a sua imensa força e legado de bons exemplos, apenas a sua lembrança me recupera para continuar, não apenas este trabalho, mas todas as minhas atividades atuais e futuras.*

AGRADECIMENTOS

Qualquer trabalho, por mais simples que seja, para ser concluído, é necessária a ajuda de outras pessoas, sejam elas atuantes direta ou indiretamente no processo.

Para um trabalho desta magnitude, é praticamente impossível, ser realizado sem a participação de outras pessoas motivadas em sua conclusão. Quero registrar meu agradecimento para essas pessoas.

Muito agradeço aos meus orientadores, Prof. Alvim e Prof. Aquilino, os quais além de apresentarem soluções para problemas, para mim, sem solução, também demonstraram grande tolerância com relação às minhas limitações e erros. Não são apenas professores e orientadores, mas através de suas atitudes, ficou muito evidente que também são grandes amigos.

Sou muito grata ao amigo e colega de trabalho, Luis Carlos Pereira. Teria que dissertar um longo texto para tentar resumir a importância da sua contribuição neste trabalho.

Aos colegas de trabalho, os quais através de uma palavra de apoio ou uma tarefa a mais assumida para reduzir minhas responsabilidades, para que eu pudesse melhor me dedicar a este trabalho, muito agradeço.

Agradeço aos meus superiores, que sem restrição, permitiram que eu desenvolvesse este trabalho, demonstrando total confiança em minha capacidade profissional.

Agradeço a todos os amigos que, mesmo sem saber, foram muito importantes durante esse período.

Enfim, agradeço a **Deus** por tudo em minha vida.

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

OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UMA USINA NUCLEAR DO TIPO
PWR

Nelbia da Silva Lapa

Outubro/2005

Orientadores: Antonio Carlos Marques Alvim.

Aquilino Senra Martinez.

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho tem como principal objetivo estabelecer as condições operacionais do circuito secundário de uma usina nuclear do tipo *Pressurized Water System*, para diversos níveis de potência, sem implementação de novos (ou modificação de) equipamentos, que gere a máxima eficiência térmica.

A eficiência térmica é calculada a partir de um programa, o qual tem como base as equações de conservação de massa e energia do modelo homogêneo. Os parâmetros inerentes à geometria do circuito e às características específicas dos componentes do circuito, são estimados a partir de um conjunto de valores para os diversos parâmetros termodinâmicos em diversos níveis de potência empregando uma ferramenta de otimização, possibilitando um cálculo de balanço térmico mais realista com relação à planta analisada. Conhecidos os coeficientes necessários para o cálculo do balanço térmico, a ferramenta de otimização é empregada para estimar os parâmetros de operação que definem a máxima eficiência térmica para o nível de potência definido.

Assim, otimizando os parâmetros operacionais, maximiza-se a quantidade de energia gerada por quantidade de combustível utilizado, promovendo um ganho de capital, sem troca de equipamento.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

OPTIMIZATION OF THERMAL EFFICIENCY OF A NUCLEAR CENTRAL
POWER LIKE AS PWR

Nelbia da Silva Lapa

October/2005

Advisors: Antonio Carlos Marques Alvim
Aquilino Senra Martinez.

Department: Nuclear Engineering

The main purpose of this work is the definition of operational conditions for the steam and power conversion of a *Pressurized Water Reactor* (PWR) plant in order to increase its system thermal efficiency without changing any components, based on the optimization of operational parameters of the plant.

The thermal efficiency is calculated by a thermal balance program, based on conservation equations for homogeneous modeling. The circuit coefficients are estimated by an optimization tool, allowing a more realistic thermal balance for the plant under analysis, as well as others parameters necessary to some component models.

With the operational parameters optimizations, it is possible to get to a level of thermal efficiency that increases capital gain, due to a better relationship between the electricity production and the amount of fuel used, without any need to change components in the plant.

ÍNDICE

1 – Introdução.....	1
1.1- Contextualização do problema.....	1
1.2 – Revisão bibliográfica.....	4
1.3 – Objetivo.....	8
1.4 – Organização do trabalho.....	10
2 – Descrição do circuito secundário de Angra 2.....	12
2.1 – Descrição do circuito.....	12
2.2 – Condições de operação dos componentes do circuito.....	15
2.3 – Caminhos de escoamento e pontos de referência.....	23
3 – Equações de conservação para escoamentos bifásicos e ciclos termodinâmicos.....	27
3.1 – Equações de conservação aplicadas neste trabalho.....	27
3.2 – Ciclos termodinâmicos.....	38
4 – Conceitos básicos e algumas ferramentas de otimização.....	50
4.1 – Introdução.....	50
4.2 – Otimização do rendimento térmico do circuito.....	51
4.3 – Processo de otimização <i>quasi-Newton</i>	52
4.4 – Processo de otimização por Algoritmo Genético.....	54
4.5 – Implementação do problema.....	65
5 – Estrutura do sistema de cálculo do rendimento térmico.....	66
5.1 – Resultados do programa de balanço térmico.....	66
6 – Resultados e conclusões.....	71
6.1 – Resultados otimizados com 5 variáveis.....	71
6.2 - Resultados otimizados com 6 variáveis.....	73
6.3 – Comparação dos resultados com outros trabalhos.....	76

6.4 – Conclusão.....	78
Referências bibliográficas.....	80
Apêndice A.	83
Apêndice B.....	89

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicialmente são apresentadas uma breve descrição do problema a ser estudado e uma revisão bibliográfica das referências publicadas na área de otimização de eficiência térmica na geração de energia, a partir de fonte nuclear. Seguindo esses indicativos, são destacados os objetivos da tese e as contribuições do trabalho. Ao final do capítulo é feita uma apresentação da organização dos assuntos ao longo do corpo da tese.

1.1 Contextualização do Problema

O problema de geração de energia para atender a demanda crescente de consumo é de ordem mundial e, isto promove um esforço concentrado em apresentar propostas que atenuem ou resolvam esse problema. São inúmeras as propostas, podendo ser citadas como alguns exemplos: projetos de equipamentos mais eficientes que integrem unidades de geração em operação; novas tecnologias de geração, por exemplo, biomassa, energia eólica, energia solar; novos materiais condutores que permitam a redução da perda de energia durante a transmissão da mesma entre outros. Todos os projetos têm que apresentar uma relação atraente de custo e benefício, além de um estudo detalhado quanto à segurança e não degradação do meio ambiente.

O Brasil, enquadrado nesse contexto, apresenta peculiaridades que agravam esse problema. A matriz energética brasileira possui grande dependência da geração

hidrelétrica, a qual corresponde a uma disponibilidade de, aproximadamente, 74.3% do total da energia disponível no país no ano de 2003, de acordo com informações apresentadas pelo Ministério de Minas e Energia no relatório de Balanço Energético Anual de 2004, disponível através do endereço eletrônico <http://www.mme.gov.br>, do referido ministério. O aumento da demanda de energia, associado a investimentos insuficientes em geração e transmissão e a um período longo de estiagem, culminou na grande crise energética no período de 2001 a 2002, a qual submeteu a sociedade brasileira a uma rígida restrição de consumo de energia. A mudança da diversidade de geração de energia quanto às fontes de geração de energia requer um período longo de investimento para alterar a matriz energética. A construção de usinas que queimam combustíveis fósseis apresenta o problema de controle de emissão de gases poluentes. A produção de energia utilizando fonte nuclear é uma decisão já adotada pelo país, sendo uma alternativa viável para amenizar a crise e, mundialmente torna a ser uma opção de geração de energia bastante atrativa.

As termonucleares têm gerado grande polêmica, principalmente quanto à segurança, armazenamento definitivo do lixo nuclear e, também com relação aos custos de produção. O custo de operação de uma usina nuclear é historicamente alto, devido às exigências de segurança. Mas essa característica tem mudado significativamente a partir da década de 80, devido ao desenvolvimento de novas técnicas de projeto, operação e, principalmente, manutenção dessas instalações. Assim, o custo de operação tem sido reduzido, enquanto a segurança tem sido aumentada, como observado por Kröger (2000).

A importância da geração de energia pelas unidades termonucleares brasileiras, Angra 1 e 2, no que tange a redução da situação crítica do setor, é apresentada pelo Ministério de Minas e Energia, o qual também discrimina o custo do MW elétrico produzido por Angra 2. Apesar do número reduzido de unidades termonucleares (apenas duas até o momento, no Brasil), estas são de grande importância na contabilização da matriz energética brasileira, correspondendo em torno de 3,0 % da matriz energética. Analisando o aumento da demanda por energia e a matriz energética brasileira que apresenta grande dependência das usinas hidrelétricas, verifica-se a necessidade do aumento da geração de energia e do aumento da diversidade de geração. Muito mais urgente torna-se a necessidade do desenvolvimento de processos que aumentem a quantidade de energia gerada pelas usinas já em operação. Essa urgência pode ser atendida através de um estudo da melhoria da eficiência térmica da unidade de geração, através do controle da condição de operação, sem a necessidade de troca de qualquer componente da usina. Assim, baseado neste contexto, este estudo visa contribuir para o aumento da produção de energia através do aumento da eficiência térmica de uma termonuclear do tipo *Pressurized Water Reactor* (PWR). Este estudo verifica as condições de operação da termonuclear estudada para níveis de operação inferiores à plena carga, ou seja, para níveis de operação menores do que 100 %. Esta característica peculiar das termonucleares brasileiras se deve ao fato das mesmas atenderem à demanda do Sistema Elétrico. Tendo sido a usina projetada, de certa forma otimizada para operação à plena carga, e dada a peculiaridade das nossas usinas, é mister haver um metodologia que permita encontrar as condições operacionais que gerem a maior eficiência térmica possível.

Em 2004 a Eletronuclear obteve como receita operacional, devido ao suprimento de energia, o valor de 883 milhões de reais. Admitindo que a unidade de Angra 2 contribua com 2/3 dessa geração e se fosse possível um aumento de eficiência em torno de 1,5 %, o aumento da receita corresponderia a 13 milhões de reais por ano. Este fato dá a dimensão do impacto econômico que modificações operacionais, tais como as sugeridas neste trabalho, geram.

1.2 Revisão bibliográfica

Historicamente, como é apresentado por *Salisbury* (1950), verifica-se que os níveis de eficiência são aumentados não somente pelas melhorias realizadas no projeto dos componentes das unidades, por exemplo nas turbinas, mas principalmente pela melhoria do ciclo térmico empregado no circuito de geração de energia. Essa referência fortalece a justificativa de estudos voltados para melhor operação das usinas nucleares. Mesmo admitindo-se que as usinas estejam projetadas para operar em condições que resultam na sua máxima eficiência térmica, relembramos que nossas usinas operam abaixo da carga completa de 100%. O nível de operação das usinas nucleares no Brasil é estabelecido em função da geração hidrelétrica, ou seja, operam visando contribuir para a estabilidade do Sistema Elétrico. Podemos citar como exemplo, a ocorrência de uma necessidade maior de energia gerada pelo problema de transmissão em outubro de 2005, como relatado pela Eletronuclear (www.eletronuclear.gov.br), operadora das termoeletrônicas no Brasil. Este fato é corroborado pela figura 1.1, extraída do Relatório

de Operação da Usina de Angra 2 (2003), suportado pela norma da CNEN-NN-1.14, que versa sobre Relatórios de Operação de Usinas Termonucleares. Essa figura apresenta o nível médio de operação de Angra 2 no ano de 2003, cuja média corresponde a 84,4 %.

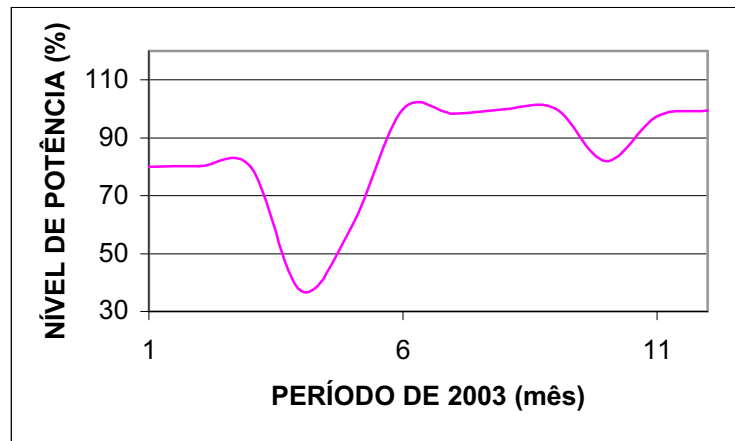


Figura 1.1 – histórico do nível de operação de Angra 2 em 2003

A figura 1.1 representa o histórico do nível de operação de referente ao ano de 2003, mas o mesmo fato é repetido nos demais anos da unidade em questão. Também ocorre fato semelhante quanto à operação de Angra 1. Então, para níveis de potência diferentes de 100%, é necessário estabelecer a condição operacional que redunde na máxima eficiência térmica, o que proporcionaria uma redução no custo de geração do MW elétrico.

Entretanto, faz-se necessário lembrar que são inúmeros os fatores que interferem no nível de eficiência térmica, cada qual com relevância diferenciada. Isto representa uma certa dificuldade em se estabelecer quais os parâmetros relevantes e seus graus de

importância para o aumento da eficiência térmica. A dificuldade na escolha das variáveis do processo a serem analisadas, apresentadas por *El-Wakil* (1971), justifica o emprego de técnicas de otimização que ponderem a relevância das mesmas atendendo às restrições impostas pela segurança de operação de uma unidade nuclear geradora de energia elétrica.

Estudos para efeito de aumento da eficiência térmica dos componentes de circuito dos ciclos termodinâmicos, têm sido realizados. Como exemplo, podemos citar o trabalho de Vieira (2004) que apresenta uma metodologia para otimização de processos térmicos de geração de energia, aplicada à unidades de cogeração. Emprega um sistema de cálculo de simulação de balanço térmico denominado IPSEpro (2000). Outro estudo desenvolvido é apresentado por Chen (2003), o qual otimiza a potência dos regeneradores de circuitos com turbina a gás em ciclos térmicos de Brayton.

Mas este trabalho reportar-se-á, mais detalhadamente em sua descrição, a trabalhos realizados como objetivo de aumentar a eficiência das termonucleares com operação inferior a 100%. Alguns estudos preliminares foram iniciados com o objetivo de melhorar a capacidade de geração das termonucleares.

No trabalho realizado por Futuro (1999), é apresentado um estudo para detectar perdas na geração eletronuclear através da simulação do ciclo de vapor da unidade Angra 1. Esse apresenta o rendimento da planta calculado através de equações parametrizadas geradas a partir de uma planilha eletrônica em EXCEL. Os dados

necessários para essas equações parametrizadas são calculados através de um programa adaptado de cálculo de rendimento térmico, variando-se a potência térmica do reator entre 75% e 100% de carga, em intervalos de 1%. A utilização da simulação em planilhas eletrônicas pode permitir o refinamento e otimização dos cálculos pela própria engenharia operacional da usina. Entretanto, neste trabalho é destacada a necessidade de substituir as equações paramétricas por equações de conservação.

No estudo de Rocha (2002), o balanço térmico do sistema secundário de unidade Angra 2, foi realizado para os níveis de potência do reator a 25%, 50%, 75% e 100%. Foi admitido um comportamento linear, entre esses diversos níveis de potência com os parâmetros termodinâmicos observados. Esta premissa possibilitou o cálculo do valor de cada variável e da eficiência térmica para níveis intermediários aos valores tabelados, sem a simulação termohidráulica de todo o circuito analisado. O principal objetivo deste trabalho foi efetuar combinações entre as extrações da turbina de baixa pressão do circuito secundário de Angra 2. Para cada nível de potência, foram realizadas combinações das extrações e calculadas as respectivas eficiências. Aplicando a ferramenta de otimização *Simulated Annealing* descrita por Bravo (2001), foi possível encontrar as condições operacionais que permitem maior eficiência térmica da planta. Este trabalho verificou que, quanto maior a quantidade de variáveis do ciclo termodinâmico submetidas ao programa de otimização, maior a eficiência encontrada para o sistema em estudo. Assim como relatado por Futuro (1999), também é destacada a importância da simulação termohidráulica do circuito, com o objetivo de representar

uma dependência mais próxima da realidade, entre os parâmetros estudados e os diversos níveis de potência de operação da unidade.

Outro trabalho nesta linha de pesquisa é apresentado por Sacco (2002), o qual emprega a ferramenta de otimização algoritmo genético para encontrar a combinação das extrações da turbina de baixa pressão, do ciclo água-vapor do circuito secundário de uma unidade termonuclear típica, para aumentar a eficiência do ciclo, apenas para 100 % de nível de operação. O balanço térmico é efetuado através do programa *PEPSE*, versão 62.1 (2001). Este programa, apesar de apresentar modelos físicos mais detalhados, é muito genérico, tendo assim, como limitação, a fidelidade quanto à descrição do circuito.

Observando o histórico das pesquisas efetuadas, percebemos a necessidade de desenvolver um sistema de cálculo capaz de calcular a eficiência da unidade Angra 2, especificamente, com suas características peculiares e também de pesquisar a aplicação de uma ferramenta de otimização mais apropriada para as condições do problema. Assim, dando continuidade à linha de pesquisa iniciada, este trabalho, tem a pretensão de atingir esses objetivos.

1.3 Objetivo

Após a apresentação dos trabalhos já desenvolvidos, podemos destacar como principal objetivo deste trabalho, o cálculo da eficiência térmica otimizada do ciclo

térmico de uma termonuclear operando. Para esse cálculo, é necessário o desenvolvimento de um sistema de cálculo de balanço térmico e eficiência térmica específico para o circuito analisado. O fato de ser um sistema de cálculo que representa as peculiaridades do circuito, supera limitações, tais como, modelos genéricos que não apresentam distribuição de erro. O sistema de cálculo desenvolvido apresenta, como característica, o conhecimento da distribuição de erros, enquanto que para outros programas comerciais, torna-se mais difícil esse conhecimento. Com isto é possível se realizar uma análise mais realista dos resultados obtidos. Assim sendo, este trabalho consiste , além da otimização da eficiência térmica, também na elaboração de um sistema de cálculo de balanço térmico, dedicado ao circuito analisado.

O circuito que será adotado para o estudo é o da usina de Angra 2. Empregando o sistema de cálculo do balanço térmico de Angra 2, desenvolvido neste trabalho, otimiza-se a eficiência térmica para níveis de potência diferentes de 100%, para o qual, originalmente, a usina é ajustada e otimizada.

Ressalta-se que, ao empregar uma ferramenta de otimização para a busca dos parâmetros característicos do circuito, traduziu-se melhor o comportamento das variáveis termodinâmicas, permitindo obter-se valores mais próximos da realidade.

Este trabalho também destaca a importância da escolha da ferramenta de otimização em função do número e de quais variáveis estão sendo otimizadas. Ou seja, trabalha-se com um maior número de variáveis operacionais a serem otimizadas e,

dependendo do conjunto de dados analisado são gerados espaços de busca distintos que justificam o emprego de ferramentas de otimização mais apropriadas para cada caso.

Algumas técnicas de otimização são apresentadas por Ávila (2003). Neste trabalho, em particular, foram empregadas duas técnicas de otimização, para o processo da busca da melhor eficiência térmica. Essas técnicas foram escolhidas considerando-se o pouco conhecimento do espaço de busca gerado quando combinadas as variáveis otimizadas. Uma tem como base métodos determinísticos, baseada no cálculo de derivadas, ou em aproximações destas. Necessitam, portanto de alguma informação do vetor gradiente, seja procurando o ponto onde ele se anula ou usando a direção para a qual aponta. Mais especificamente, foi utilizada uma rotina descrita por Press (1986) a qual minimiza funções de N variáveis utilizando o método de *quasi-Newton*. Não é possível, a priori, afirmar que o resultado encontrado seja o mais provável máximo global. A outra técnica está baseada em métodos estocásticos, os quais utilizam um conjunto de ações que buscam o ótimo de maneira “aleatória orientada”, sem necessitar de qualquer informação de derivadas ou sobre o comportamento do problema. A técnica estocástica escolhida para emprego neste trabalho, foi o Algoritmo Genético. Esta escolha se deve a potencialidade deste método em encontrar o candidato, mais provável, ao ótimo global.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho é apresentado seguindo a seguinte distribuição de assuntos por capítulos.

Neste capítulo 1, é apresentada a motivação que levou ao desenvolvimento desta pesquisa, assim como os trabalhos já desenvolvidos e o que é aqui apresentado. A descrição do circuito estudado é realizada no capítulo 2, que induz o leitor a compreender o circuito para efeito de entendimento do sistema de cálculo do rendimento térmico. Não somente o circuito é descrito, mas também algumas características operacionais de alguns componentes e suas limitações operacionais em função da segurança operacional. Prosseguindo na descrição do texto, apresenta-se o capítulo 3 com as equações de conservação que descrevem, termodinamicamente, o circuito e os modelos aplicado aos seus componentes. Também é realizada uma breve dissertação sobre ciclo termodinâmico, com o objetivo de destacar o motivo da escolha das variáveis otimizadas. As técnicas de otimização empregadas neste estudo, são descritas no capítulo 4, assim como as variáveis otimizadas. O sistema de cálculo do rendimento térmico do circuito é descrito no capítulo 5 e também são destacados os resultados obtidos para efeito de validação do mesmo. Finalmente, no capítulo 6, são descritos os resultados do processo de otimização e a conclusão do trabalho.

CAPÍTULO 2. DESCRIÇÃO DO CIRCUITO SECUNDÁRIO DE ANGRA 2

Este capítulo descreve o circuito secundário da termonuclear Angra 2, sendo o principal objetivo apresentar o caminho do fluido de trabalho e suas condições termodinâmicas. Assim, tornar-se-ão mais compreensíveis as considerações adotadas para aumentar a sua eficiência térmica, através das mudanças no modo de operação.

2.1 – Descrição do circuito

Esse circuito, também é identificado como sistema do ciclo água-vapor, ou seja, corresponde ao transporte de energia da central através de água – vapor para manter em movimento o grupo turbina-gerador.

A figura 2.1, apresentada por Rocha (2002), ilustra os sistemas primário e secundário de uma central nuclear com 4 loops.

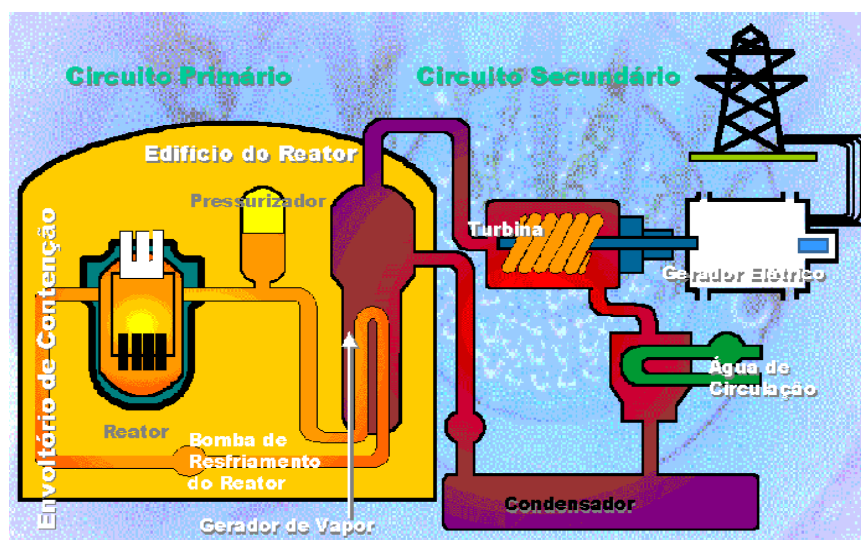


Figura 2.1 – esquema simplificado dos circuitos primário e secundário de uma Central Nuclear PWR com quatro loops.

O reator nuclear gera a energia, sob forma de calor, que é conduzida no circuito primário e transmitida ao circuito secundário da usina nuclear através do componente gerador de vapor. O fluido de trabalho, a água em estado líquido no lado secundário do gerador de vapor, ao receber a energia do circuito primário, muda seu estado para vapor saturado. A figura 2.2 ilustra, simplificada, o percurso efetuado pelo fluido de trabalho para transferir sua energia para o componente turbo-gerador e, enfim, produzir energia elétrica.

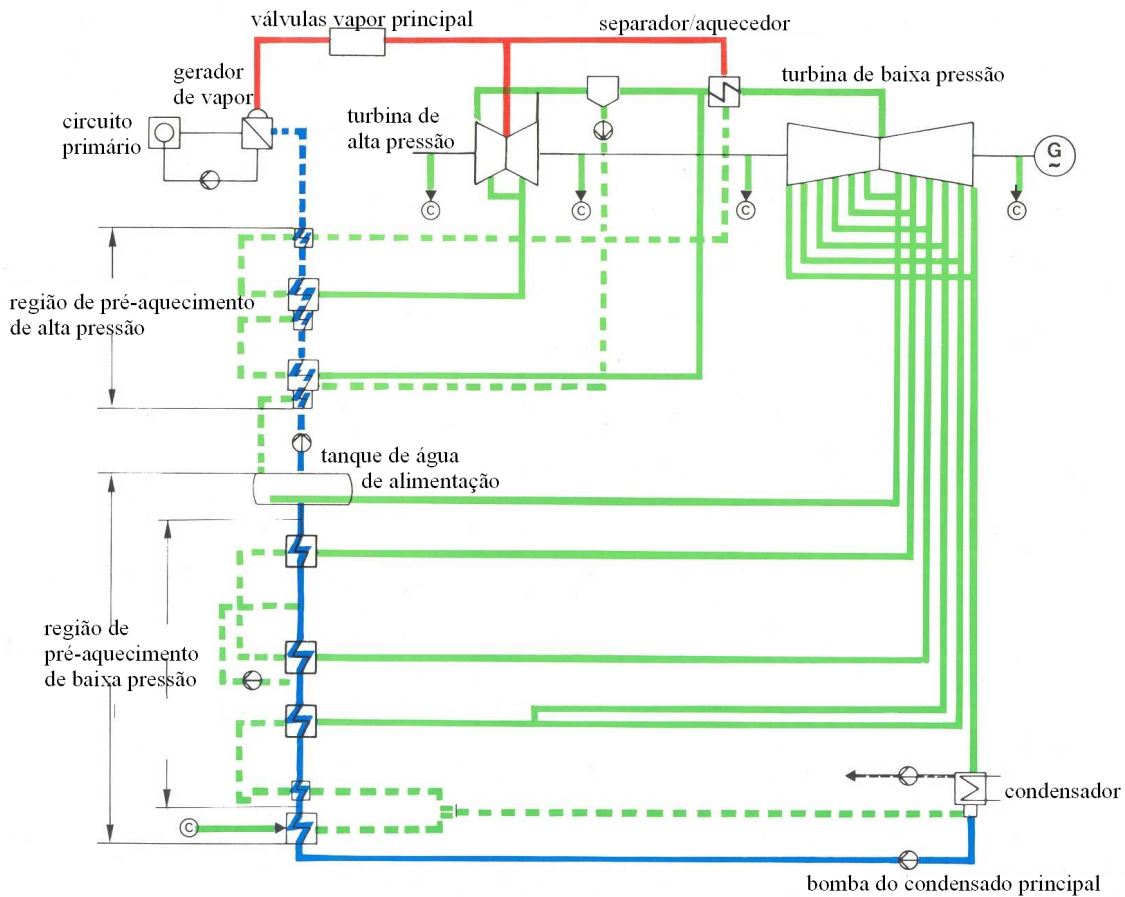


Figura 2.2 – circuito secundário de uma central nuclear do tipo PWR com quatro circuitos

- vapor vivo (sai do gerador de vapor)
- vapor saturado após extrações
- ⋯ líquido saturado após extrações
- condensado principal

Ao sair do gerador de vapor, o vapor saturado (vapor vivo) passa por um conjunto de válvulas e cerca de 95% de seu volume alimenta a turbina de alta pressão, enquanto que o restante é direcionado para que o fluido de trabalho, antes da entrada na turbina de baixa pressão, atinja o estado de superaquecimento. Na turbina de alta pressão é realizada uma extração que é conduzida para a região de pré-aquecimento de alta pressão e o restante do fluido segue para o separador (desumidificador). Após o separador, o qual extrai 0,5% da umidade do fluido, é efetuada uma drenagem direcionada para a região de pré-aquecimento de alta pressão. Após a desumidificação, o vapor é superaquecido, recebendo energia do vapor vivo, desviado após as válvulas do gerador de vapor, e atinge a turbina de baixa pressão. Na turbina de baixa pressão são realizadas cinco extrações, sendo o fluido da primeira orientado para o tanque de água de alimentação. A segunda e terceira extrações, são direcionadas para a região de pré-aquecimento de baixa pressão. A quarta e quinta extrações, são combinadas em uma única extração, e também, são descarregadas na região de pré-aquecimento de baixa pressão.

Observa-se que a quarta extração é uma drenagem realizada na turbina para extrair fluido no estado líquido saturado, com efeito de preservar a turbina. Finalmente, o fluido de exaustão da turbina de baixa pressão, é conduzido ao condensador o qual gera o condensado principal. O condensado principal é aquecido na região de pré-aquecimento de baixa pressão, a qual é composta por cinco trocadores de calor, até atingir o tanque de água de alimentação principal, que também recebe fluido da primeira extração da turbina de baixa pressão, como anteriormente citado. O tanque de

água de alimentação atua como um reservatório (pulmão) que fornece água para as bombas de água de alimentação que a conduzem para os trens de pré-aquecimento de alta pressão, até atingir os geradores de vapor. A região de pré-aquecimento de alta pressão é constituída por três trocadores de calor. Finalmente, após a passagem na região de alta pressão, o condensado retorna para o gerador de vapor.

2.2 Condições de operação dos componentes do circuito

É importante definir a função no circuito e as características operacionais dos principais componentes do circuito, como descrito em *FSAR* (2005) . Assim é possível o melhor entendimento das premissas e restrições admitidas durante o desenvolvimento deste trabalho.

A figura 2.3 apresenta o circuito com os pontos de referência para o cálculo do balanço térmico. Esta também ilustra o caminho do fluido de trabalho ao longo do mesmo. Assim, os itens 2.2 e 2.3 terão como referência essa figura para melhor entendimento do trabalho desenvolvido e suas peculiaridades. O desenvolvimento do cálculo de balanço térmico considerou os caminhos realizados pelo fluido de trabalho e suas condições termodinâmicas, nos pontos determinados, em quatro níveis de potência (25 %, 50 %, 75 % e 100 %).

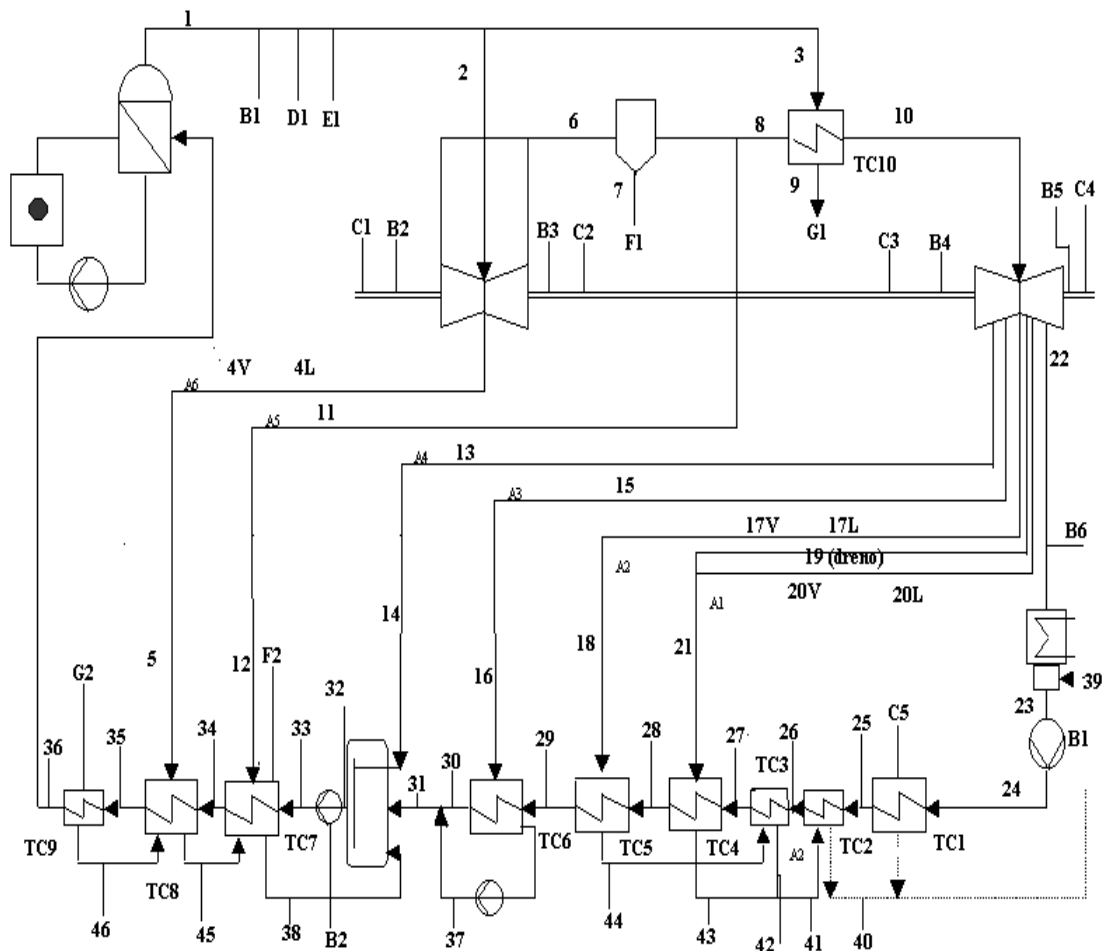


Figura 2.3 – circuito de geração de vapor de Angra 2 ilustrando os pontos de referência para o cálculo de balanço térmico

a - Turbinas

Para as turbinas, as regiões entre duas extrações consecutivas, a entrada da turbina e a primeira extração, e entre a última extração e a saída da turbina são considerados como estágios fictícios, representando os grupos de estágios reais. Tal consideração se faz necessária devido à falta de informação sobre os estágios reais da turbina e devido apenas a existência de dados termo-hidráulicos na entrada e saída da

turbina e nos pontos de extração. A propriedade a ser preservada em cada estágio é o seu rendimento, obtido como a queda de entalpia real (no estágio fictício) sobre a queda de entalpia isoentrópica.

- Turbina de Alta Pressão (TAP)

A TAP converte cerca de 12% da energia térmica produzida no reator em energia mecânica quando da expansão do vapor que ocorre em seus estágios e supre vapor para o pré-aquecedor da região de alta potência em altos níveis de operação, acima de 25% da potência de nominal. O vapor principal na entrada da TAP está a 62,6 bar de pressão com um título de 0,99959. A extração da TAP que alimenta o pré-aquecedor ocorre com uma pressão de 21,54 bar e título de 0,89.

- Turbina de Baixa Pressão (TBP)

O vapor que sai da TAP é seco mecanicamente e reaquecido. Quando entra na TBP, a pressão do vapor é de 11,0 bar e com a temperatura em torno de 260 °C. Na exaustão atinge a pressão de cerca de 0,09 bar e um título de 0,90. São realizadas quatro extrações e uma drenagem de líquido saturado entre a primeira e segunda extrações.

Da carcaça da TAP é extraído vapor (A6) para o preaquecedor de alta pressão, o qual corresponde ao TC8 na figura 2.3 com pressão de 21,54 bar e conteúdo de vapor $X = 0,89$.

Os limites de operação da turbina quanto ao título, definem a faixa de busca para a otimização das extrações, ou seja, apesar da possibilidade de se admitir qualquer extração, há valores que implicam em regiões de título da mistura não permitidos, devido à corrosão nas pás das turbinas.

b – Sistema de água de alimentação principal (LAB), condensados auxiliares de alta pressão e baixa pressão

Na saída do tanque de água de alimentação, inicia-se o Sistema de Água de Alimentação Principal (LAB). As 3 bombas de água de alimentação principal, de 55 % de capacidade cada, estão conectadas ao tanque de água de alimentação através de 3 linhas de sucção. A bomba de água de alimentação principal é composta de duas bombas em separado, uma bomba reforçadora e uma bomba principal. Em operação normal, duas bombas de água de alimentação estão em operação, sendo que a terceira está como bomba auxiliar.

À jusante das bombas de água de alimentação principal, o fluxo de água de alimentação une-se num coletor, numa combinação da válvula de isolamento e de desvio. Neste coletor ocorre a derivação para os dois trens de preaquecimento de alta pressão, em paralelo. Estes trens são supridos de forma idêntica, pelas duas extrações da turbina de alta pressão de duplo fluxo, dispostos simetricamente. Cada trem de preaquecimento de alta pressão é composto dos seguintes estágios de preaquecimento, os quais são introduzidos na ordem inversa em relação ao fluxo de água de alimentação.

O resfriador de condensado do reauecedor representa o último estágio de preaquecimento, ou seja, nele a temperatura da água de alimentação aumenta até alcançar a temperatura de entrada do gerador de vapor. Após deixar o resfriador, o condensado do reauecedor é conduzido para a carcaça do preaquecedor TC8 da água de alimentação a alta pressão.

Através da condensação do vapor proveniente da extração de alta pressão A6, a água de alimentação é aquecida no preaquecedor da água de alimentação de alta pressão TC8. O condensado aquecido que surge junto com o condensado do reauecedor é conduzido para o resfriador de condensado de alta pressão.

Desde que a combinação do condensado aquecido e o condensado do reauecedor está num nível de temperatura mais alta do que a temperatura da água de alimentação na saída do preaquecedor de alta pressão TC7, a transferência de calor é feita no resfriador de condensado de alta pressão TC8. Através do resfriamento do condensado auxiliar neste resfriador, é evitada uma grande expansão quando este condensado for descarregado no tanque de expansão do preaquecedor de alta pressão TC7.

De modo análogo ao preaquecedor de água de alimentação a alta pressão TC8, no preaquecedor de água de alimentação a alta pressão TC7, a liberação do calor de evaporação proveniente da condensação do vapor da extração A5 é transferida para a

água de alimentação. O vapor de aquecimento é extraído de uma derivação entre a turbina de alta pressão e a turbina de baixa pressão.

O resfriador de condensado a alta pressão TC6 representa o primeiro estágio de preaquecimento de alta pressão para a água de alimentação. Além da transferência de calor para a água de alimentação, o resfriador tem a finalidade de baixar a temperatura dos condensados auxiliares mencionados no item anterior, para um nível de temperatura adequada que se aproxime das condições existentes no tanque de água de alimentação.

Depois de passar através dos trens de preaquecimento ou, um trem de preaquecimento e uma linha de desvio (bypass), a água de alimentação vai para um coletor, que a distribui através de quatro trens independentes para os quatro geradores de vapor.

Das carcaças das TBPs, é extraído vapor para os preaquecedores de baixa pressão (BP), que correspondem aos TC1-6, na figura 2.3, e para o tanque de água de alimentação, nas seguintes condições.

- A1 (preaquecedores - duplex) $p = 0,22 \text{ bar}$; $X = 0,39$
- A2 (preaquecedores - duplex) $p = 0,062 \text{ bar}$; $X = 0,17$
- A3 (preaquecedor BP) $p = 2,57 \text{ bar}$; $X = 0,03$
- A4 (tanque de água de alimentação) $p = 5,44 \text{ bar}$; $T = 167,2 \text{ }^\circ\text{C}$

O vapor da extração para o pré-aquecedor TC6, é ainda levemente superaquecido e isento, portanto, de qualquer umidade. A água de alimentação alcança a temperatura de 218 °C ao final do ciclo do preaquecimento, com a qual entra no GV.

c - Separador de Umidade e Aquecedor

O separador de umidade e o aquecedor consistem de um sistema que tem como objetivo separar a água na exaustão da turbina de alta pressão em forma de gotas e de corrente de água, através de pré-separação e separação principal de umidade, reaquecimento do vapor desumidificado mecanicamente que sai do separador de umidade principal e a utilização do vapor de aquecimento necessário para o reaquecimento e condensação do mesmo nos tubos de aquecimento do reaquecedor.

Os separadores de umidade são dimensionados para, em conjunto, efetuarem a separação de, aproximadamente, 1779,81 Kg/s de vapor úmido com a proporção de 13 % de água para uma umidade final menor que 0,5 %. É importante destacar que a separação de umidade permaneça totalmente efetiva, em todas as condições de carga e nas diferentes velocidades de vapor.

O reaquecedor entra em operação somente com uma potência do gerador de 30 %. Sendo assim, a temperatura de saída dos reaquecedores, até esse nível de potência é igual a temperatura de entrada nos separadores de umidade.

d – Tanque de Água de Alimentação

O tanque de água de alimentação pode ser tratado como um trocador de calor aberto cuja quantidade de massa e energia que entra no dispositivo é igual à quantidade de massa e energia que sai do trocador. Neste caso não existe uma propriedade térmica a ser preservada, sendo apenas importante observar a conservação de massa e energia. A função do tanque de água de alimentação é atuar como um “pulmão” (*buffer*) para diferentes quantidades de entrada e saída de condensado. O condensado principal entra no tanque de água de alimentação através de borrifos (*sprays*), criando uma grande superfície de contato da água de alimentação para promover uma efetiva retirada de ar.

A água no tanque é pré-aquecida por vapor extraído do ponto de extração A4 da turbina de baixa pressão. Através da introdução, na água, do vapor extraído, a água é mantida em ponto de ebulição (estado de saturação) e a desaeração residual é realizada. A pressão do tanque de água de alimentação, basicamente, acompanha a carga da planta, ou seja, com o aumento de carga, a pressão do tanque aumenta na mesma proporção. Entretanto, para cargas abaixo de 45 %, a pressão do tanque cairia abaixo de 2 bar e, devido a razões inerentes à desaeração, uma pressão mínima de 2 bar deve ser mantida.

2.3 Caminhos de Escoamento e Pontos de Referência

Para efetuar o cálculo termodinâmico é necessário conhecer as condições do fluido de trabalho ao longo do circuito. Então, faz-se necessário estabelecer pontos de referência no circuito para expressar as condições do fluido sob as variáveis termodinâmicas. As propriedades que representam essas condições são a pressão, temperatura, qualidade, entalpia e vazão mássica. A figura 2.3, no item 2.2, apresenta o circuito com os pontos de referência numerados.

O fluido sai do secundário do GV em um estado de vapor quase saturado (Ponto 1) e a maior parte dele (quase 95%) é dirigida para a turbina de alta pressão (Ponto 2) e o restante para superaquecimento da turbina de baixa (Ponto 3).

Na turbina de alta, efetua-se uma extração (Pontos 4 e 5) e o restante do fluido é dirigido para o desumidificador (Ponto 6). No desumidificador é feita uma purga (Ponto 7) para reduzir a umidade a cerca de 0,5% e após a purga é feita uma extração (Pontos 11 e 12) e o restante do fluido é levado ao TC de superaquecimento (TC10), atingindo o Ponto 8.

No TC10 o fluido é superaquecido para entrar na turbina de baixa (Ponto 10), obtendo energia do resfriamento do fluido de superaquecimento, que é levado a atingir o Ponto 9.

Observa-se que os pré-aquecedores destacados na figura 2.3 são TC descritos no texto, obedecendo a ordem apresentada.

Nas turbinas de baixa são feitas cinco extrações e na primeira extração (Pontos 13 e 14), o fluido é conduzido para o tanque de água de alimentação.

Na segunda extração (Pontos 15 e 16), o fluido é conduzido ao sexto trocador de baixa (TC6).

Na terceira extração (Pontos 17 e 18), o fluido é conduzido ao quinto trocador de baixa (TC5).

A quarta extração (Ponto 19) e a quinta (Ponto 20) são combinadas em um único escoamento (Ponto 21) até o quarto trocador de baixa (TC4).

A água de exaustão da turbina (Ponto 22) é conduzida até o Condensador e contíguo ao condensador, existe o *Hot Well*, sendo que o fluido, após a passagem pelos dois (Ponto 23), atinge a bomba de condensado que fornece pressão ao fluido (Ponto 24). A eficiência de operação dessa bomba é considerada em 86 %, como informado na tabela 10.4-2 do *FSAR* (2005).

O fluido então passa pelo primeiro trocador de baixa (TC1), cuja água de alimentação é proveniente de sistemas auxiliares dos eixos das turbinas de alta e baixa, atingindo o Ponto 25.

A seguir, pelo segundo (TC2) e terceiro (TC3) trocadores de baixa, cujas águas de alimentação também são provenientes dos outros trocadores de baixa, atingindo, respectivamente, os Pontos 26 e 27.

Depois o fluido passa pelo quarto (TC4), quinto (TC5) e sexto (TC6) trocadores de calor, cujas águas de alimentação são provenientes das extrações das turbinas de baixa, atingindo respectivamente os Pontos 28, 29, 30.

O fluido de alimentação que sai do TC6 (Ponto 37) é injetado na linha de condensado, atingindo-se o Ponto 31.

As águas de alimentação dos trocadores TC4 e TC5 são conduzidas para o tanque TC2 (sendo a do TC5 passando pelo TC3), e estes caminhos são indicados pelo Ponto 42 (entre TC2 e TC3), pelo Ponto 43 (entre TC2 e TC4) e pelo Ponto 44 (entre TC3 e TC5).

Após a passagem pelo Tanque de Água de Alimentação (TAA) atinge-se o Ponto 32 e depois passa-se por uma nova bomba de condensado, atingindo o Ponto 33.

Após o TAA e a bomba consecutiva, passa-se pelo primeiro trocador de calor de alta (TC7), cuja água de alimentação é proveniente da extração feita na linha de vapor principal, após a desumidificação, atingindo o Ponto 34.

Depois, passa-se pelo segundo trocador de calor de alta (TC8), cuja água de alimentação é proveniente da extração de alta, atingindo o Ponto 35.

A seguir, passa pelo terceiro trocador de alta (TC9), cuja água de alimentação é proveniente da água de alimentação proveniente do TC10, atingindo o Ponto 36, que representa a entrada dos GVs, o que obviamente corresponde ao final do ciclo

Existe uma condução da água de alimentação do TC6 para linha do condensado antes do TAA, indicada pelo ponto 37. Existe também uma ligação entre o TAA e TC7, indicada pelo Ponto 38, outra entre o TC7 e o TC8, indicada pelo Ponto 45, e uma outra entre o TC8 e o TC9, indicada pelo ponto 46. Os pontos 40 e 41 indicam a saída da água de alimentação, após a passagem pelos trocadores de calor TC1 e TC2, respectivamente.

Este caminho do fluido de trabalho é a base para o desenvolvimento do programa que efetua o balanço térmico do circuito.

CAPÍTULO 3 - EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO PARA ESCOAMENTOS BIFÁSICOS E CICLOS TERMODINÂMICOS

Neste capítulo serão, brevemente apresentadas, as equações de conservação de massa e energia aplicadas no circuito. Também são descritos, de forma resumida, alguns ciclos termodinâmicos. O objetivo é destacar a principal base teórica que fundamentou o desenvolvimento do estudo.

3.1 Equações de conservação aplicadas neste trabalho

Nesta seção serão apresentadas as equações de conservação ponto a ponto do circuito, tendo como base a figura 2.3. Todas as equações partem da premissa que o fluido de trabalho está em equilíbrio termodinâmico e em condições adiabáticas de escoamento, em todos os pontos do circuito. Os dados obtidos, através do programa desenvolvido, do balanço térmico do circuito estão apresentados no Apêndice A.

a – conservação de massa em cada ponto i do circuito

$$\sum_1^N m_{sai_i} = \sum_1^N m_{ent_i} - \sum_1^N m_{desv_i} \quad (3.8)$$

sendo:

m_{sai_i} → vazão mássica que sai do ponto i do circuito

m_{ent_i} → vazão mássica que entra do ponto i do circuito

m_{desv_i} → vazão mássica extraída / desviada do ponto i do circuito

N → número de pontos de saída / entrada / extração do ponto i do circuito

b – conservação de energia em cada ponto i do circuito

$$\sum_1^N (hm)_{sai_i} = \sum_1^N (hm)_{ent_i} - \sum_1^N (hm)_{desv_i} \quad (3.9)$$

h → entalpia no ponto analisado

c – conservação de massa e energia nas turbinas

- expansão nos estágios das turbinas

1 – Turbina de Alta Pressão (1^o estágio), ilustrado na figura 3.1

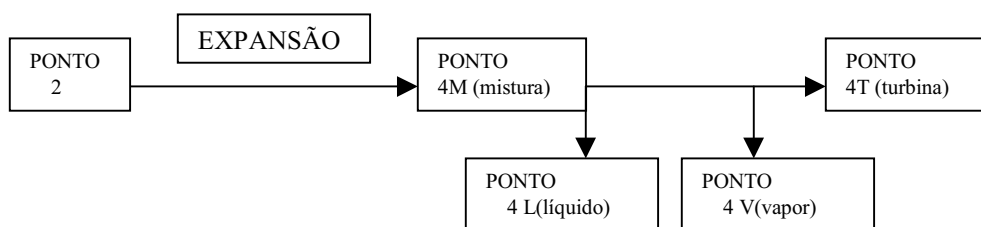


Figura 3.1 – ilustração do primeiro estágio de expansão da TAP

PONTO 2 → estado de admissão no estágio

PONTO 4 M → estado da mistura após a expansão

PONTO 4 L → estado do líquido drenado

PONTO 4 V → estado do fluido de extração

PONTO 4 T → estado do fluido que permanece na turbina

Os estados 4V e 4L representam o mesmo estado termodinâmico, diferindo em relação à vazão de escoamento

Admitindo a figura 3.1 , podemos considerar a conservação de massa e energia como:

$$m_{4M} = m_2 \quad (3.10-a)$$

$$m_{4T} = m_2 - m_{4L} - m_{4V} \quad (3.10-b)$$

$$h_{4M} = \frac{[m_{4L} \times h_{4L} + (m_{4V} + m_{4T}) \times h_{4V}]}{m_{4M}} \quad (3.10-c)$$

$$h_{4T} = h_{4V} \quad (3.10-d)$$

2 – Turbina de Alta Pressão (2^o estágio / último estágio), ilustrado na figura 3.2

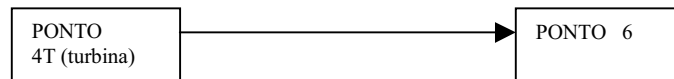


Figura 3.2 – ilustração do segundo estágio de expansão da TAP

PONTO 6 → estado do fluido de exaustão da TAP

Sendo m_{4T} e h_{4T} determinadas por (3.10-b) e (3.10-d), respectivamente.

3 - Turbina de Baixa Pressão (1^o estágio), ilustrado na figura 3.3

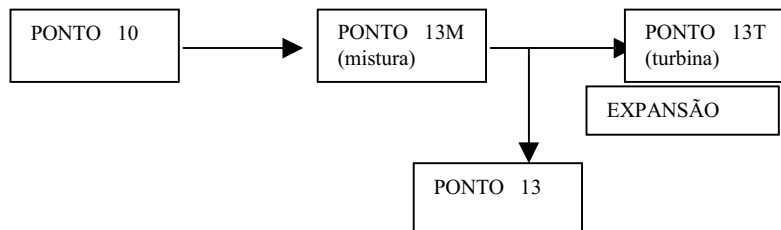


Figura 3.3 – ilustração do primeiro estágio de expansão da TBP

$$m_{13M} = m_{10} \quad (3.11-a)$$

$$m_{13T} = m_{10} - m_{13} \quad (3.11-b)$$

$$h_{13M} = \frac{[(m_{13} + m_{13T}) \times h_{13}]}{m_{13M}} \quad (3.11-c)$$

$$h_{13T} = h_{13} \quad (3.11-d)$$

Evitando descrições prolongadas, a nomenclatura das variáveis obedece a mesma lógica de formação descrita no item 1. Este procedimento será adotado nos itens seguintes.

4 - Turbina de Baixa Pressão (2^o estágio), ilustrado na figura 3.4

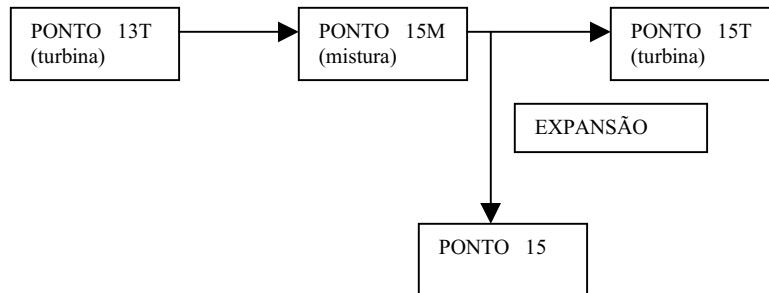


Figura 3.4 – ilustração do primeiro estágio de expansão da TBP

$$m_{15M} = m_{13T} \quad (3.12-a)$$

$$m_{15T} = m_{13T} - m_{15} \quad (3.12-b)$$

$$h_{15M} = \frac{[(m_{15} + m_{15T}) \times h_{15}]}{m_{15M}} \quad (3.12-c)$$

$$h_{15T} = h_{15} \quad (3.12-d)$$

5 - Turbina de Baixa Pressão (3^o estágio), ilustrado na figura 3.5

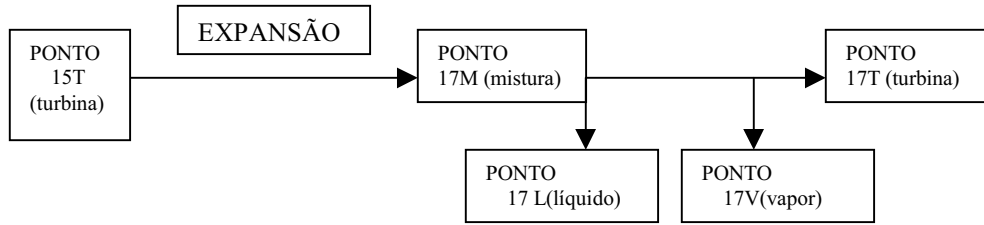


Figura 3.5 – ilustração do terceiro estágio de expansão da TBP

$$m_{17M} = m_{15T} \quad (3.13-a)$$

$$m_{17T} = m_{15T} - m_{15L} - m_{15V} \quad (3.13-b)$$

$$h_{17M} = \frac{[m_{17L} \times h_{17L} + (m_{17V} + m_{17T}) \times h_{17V}]}{m_{17M}} \quad (3.13-c)$$

$$h_{17T} = h_{17V} \quad (3.13-d)$$

6 - Turbina de Baixa Pressão (4^o estágio), ilustrado na figura 3.6

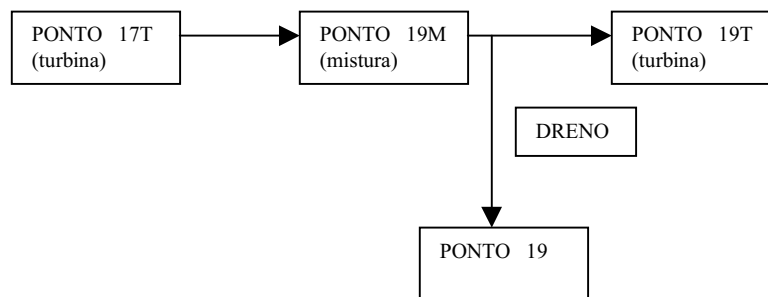


Figura 3.6 – ilustração do quarto estágio de expansão da TBP

$$m_{19M} = m_{17T} \quad (3.14-a)$$

$$m_{19T} = m_{19M} - m_{19} \quad (3.14-b)$$

Neste ponto (19), é realizada uma drenagem de líquido na TBP, após as expansões realizadas. Este procedimento tem o propósito de reduzir a quantidade de líquido na mistura para evitar corrosão na turbina. As condições termodinâmicas deste ponto foram avaliadas admitindo a hipótese de que a qualidade do fluido de trabalho no ponto 19T é igual a do ponto 20V. Esta hipótese não compromete a qualidade dos resultados, pois se admite que o fluido não sofra grandes variações termodinâmicas entre esses dois pontos, observadas as variações sofridas ao longo do circuito.

Sendo assim, admitindo $X_{19T} = X_{20V}$ e conhecendo P19 (pressão no ponto 19):

$$h_{19T} = X_{20} (h_{19V} - h_{19L}) + h_{19L} \quad (3.15-a)$$

$$h_{19M} = \frac{(m_{19} \times h_{19} + m_{19T} \times h_{19T})}{m_{19M}} \quad (3.15-b)$$

1 - $X = \frac{h - h_L}{h_{LV}}$, qualidade de uma mistura qualquer, em equilíbrio termodinâmico.

2 - $P = f(P, h)$ e , extraídas da tabela *ASME* (1992)

3 – Os regimes de escoamento são determinados por:

LÍQUIDO SUBRESFRIADO $\rightarrow X < 0$

LÍQUIDO SATURADO $\rightarrow X = 0$

MISTURA BIFÁSICA $\rightarrow 0 < X < 1$; $\rho = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l$

VAPOR SATURADO $\rightarrow X = 1$

VAPOR SUPERAQUECIDO $\rightarrow X > 1$

7 - Turbina de Baixa Pressão (5^o estágio), ilustrado na figura 3.7

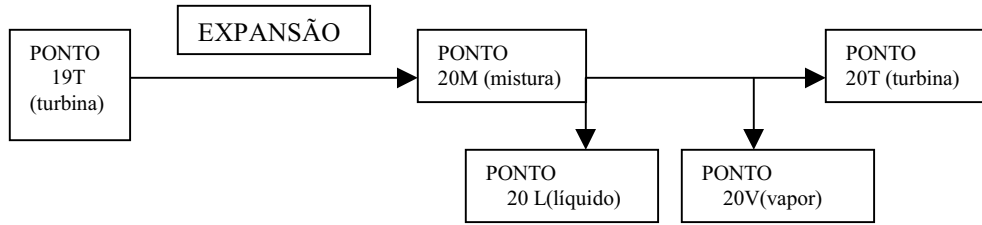


Figura 3.7 – ilustração do quinto estágio de expansão da TBP

$$m_{20M} = m_{20T} \quad (3.16-a)$$

$$m_{20T} = m_{19T} - m_{20L} - m_{20V} \quad (3.16-b)$$

$$h_{20M} = \frac{m_{20L} \times h_{20L} + (m_{20V} + m_{20T}) \times h_{20V}}{m_{20M}} \quad (3.16-c)$$

$$h_{20T} = h_{20V} \quad (3.16-d)$$

8 – Turbina de Alta Pressão (6^o estágio / último estágio), ilustrado na figura 3.8

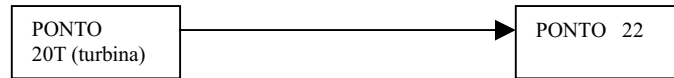


Figura 3.8 – ilustração do sexto estágio de expansão da TAP

PONTO 22 → estado do fluido de exaustão da TBP

m_{20T} e h_{20T} determinados por (3.16-b) e (3.16-d), respectivamente.

d – Separador

O modelo empregado para representar o separador segue as imposições de projeto para o equipamento. Admitindo-se um fluido com X% de massa líquida a pressão P. O separador produz perda de carga de Y bar e separa o fluido em duas partes, como ilustrado pela figura 3.9 e sendo que:

- a) mistura com 0,5% de líquido,
- b) líquido saturado, garantido por condições de projeto,

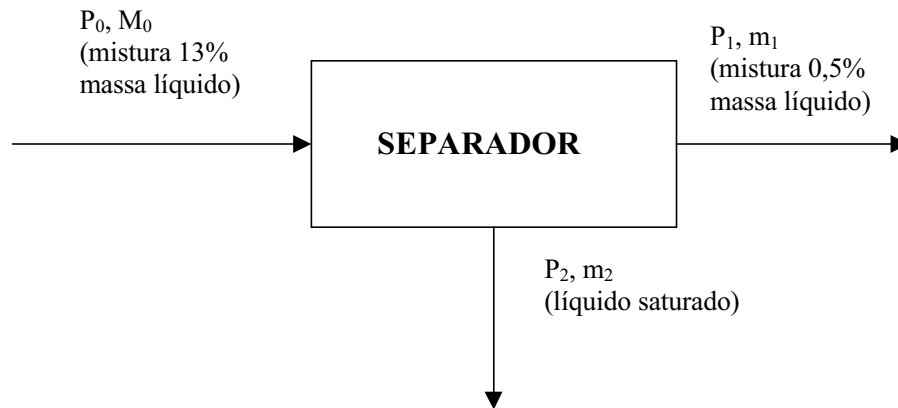


Figura 3.9 – representação simplificada do separador

Pode-se descrever o modelo físico do separador como sendo:

$$M_0 = m_1 + m_2 \quad (3.17-a)$$

$$m_{L0} = 0,13M_0 \quad (3.17-b)$$

$$m_{V0} = 0,87M_0 \quad (3.17-c)$$

$$m_{L2} = m_2 \quad (3.17-d)$$

$$m_{V2} = 0 \quad (3.17-e)$$

$$\left. \begin{array}{l} m_{l1} = 0,005 \\ m_{v1} = 0,995 \end{array} \right\} m_{v1} = m_{L1} \frac{0,995}{0,005} = m_{L1} K \quad (3.17-f)$$

Efetuada as devidas operações algébricas, tem-se:

$$(m_{L1} \quad m_{L2}) \begin{pmatrix} 200 & 1 \\ 200h_1 & h_2 \end{pmatrix} = (M_0 \quad M_0 h_0) \quad (3.17-g)$$

Sendo :

X – qualidade da mistura

h – entalpia da mistura

h_f – entalpia do líquido saturado

M_0 – massa total que entra no separador

m_{L0} – massa de líquido na mistura que entra no separador

m_{v0} – massa de vapor na mistura que entra no separador

m_{L1} – massa de líquido saturado na mistura que sai em 1 no separador

m_{L2} – massa de líquido saturado na mistura que sai em 2 no separador

m_{v1} – massa de vapor saturado na mistura que sai em 1 no separador

m_{v2} – massa de vapor saturado na mistura que sai em 2 no separador

e – Coeficientes de massa e energia

Esses coeficientes são os valores numéricos que compõem os balanços de massa e energia, assim como: área de troca de calor, coeficiente de perda de energia etc. São estimados através de um conjunto de dados termodinâmicos, em diversos níveis de

potência. Através de uma interpolação por polinômio de *Lagrange*, encontram-se os respectivos coeficientes, para os quatro níveis de potência fornecidos.

Os coeficientes de massa e energia ao longo do circuito que fecham os respectivos balanços, são calculados a partir da diferença das condições termodinâmicas do fluido de trabalho entre os pontos de entrada e saída do ponto/componente analisado.

1 – Coeficiente para bombas e trocadores de calor

- coeficiente de massa

$$\sum_{s=1}^N m_s = \sum_{e=1}^M m_e \quad (3.18)$$

onde $N \rightarrow$ número de saídas

$M \rightarrow$ número de entradas

$e \rightarrow$ entrada

$s \rightarrow$ saída

- coeficiente de energia

$$\sum_{s=1}^N (mh)_s = \sum_{e=1}^M (mh)_e \pm \Delta(mh)_{ac} \quad (3.19)$$

onde $N \rightarrow$ número de saídas

$M \rightarrow$ número de entradas

$e \rightarrow$ entrada

$s \rightarrow$ saída

$ac \rightarrow$ acumulada

A equação 3.19 apresenta o sinal de \pm indicando ganho (bombas) ou perda de energia (trocador de calor) do fluido.

$\Delta hm \rightarrow$ calculado a partir da interpolação do polinômio de *Lagrange*, que foi estabelecido a partir dos Δhm para os quatro níveis de referência de potência.

É importante ressaltar que o balanço de massa e energia nos trocadores de calor (TCs) foram averiguados através de um teste que compara a energia cedida pelo secundário com a energia recebida pelo primário do TC. A diferença de energia entre os dois lados do TC apresenta uma margem e erro inferior a 2 %, sendo esta uma importante informação para validar esse módulo do programa.

f - cálculo do máximo rendimento térmico

O rendimento do circuito secundário é calculado como a diferença entre o trabalho gerado pela turbina e o realizado pelas bombas, dividido pelo calor fornecido ao ciclo.

O calor fornecido ao ciclo é o calor gerado pelo primário e passado ao secundário através dos geradores de vapor. O trabalho das turbinas (W_T) é igual ao somatório da vazão mássica em cada estágio (m_e) vezes a diferença de entalpia (h) naquele estágio.

$$W_T = \sum_{e=1}^N m_e (h_{entrada} - h_{saida})_e \quad (3.20)$$

$e \rightarrow$ estágio da turbina

O trabalho das bombas (W_{iB}) é igual ao somatório da vazão mássica em cada bomba vezes o ganho de entalpia na passagem pela bomba.

$$W_B = \sum_{b=1}^N m_b (h_s - h_e)_b \quad (3.21)$$

onde $N \rightarrow$ número de bombas

$b \rightarrow$ bomba

$e \rightarrow$ entrada

$s \rightarrow$ saída

$B \rightarrow$ total de bombas

$Q \rightarrow$ calor total cedido ao circuito

$$\eta_{ciclo} = \frac{(W_T - W_B)}{Q} \quad (3.22)$$

$\eta_{ciclo} \rightarrow$ rendimento do ciclo

3.2 Ciclos termodinâmicos

Neste item, será feita uma breve explanação dos ciclos termodinâmicos de interesse neste trabalho, com o propósito de esclarecer premissas adotadas durante o

trabalho, principalmente quanto a escolha das variáveis a serem otimizadas para se atingir o rendimento termodinâmico otimizado.

Existem dois importantes conceitos para o cálculo da eficiência de um ciclo: o conceito de irreversibilidade e o fato de que nenhum equipamento possa produzir mais trabalho do que o calor que lhe é adicionado.

a – O ciclo de *Carnot*

O ciclo de *Carnot* é composto por quatro processos reversíveis: dois isotérmicos e dois adiabáticos, e então, isentrópicos. A figura 3.10 ilustra o diagrama temperatura (T) versus entropia (S).

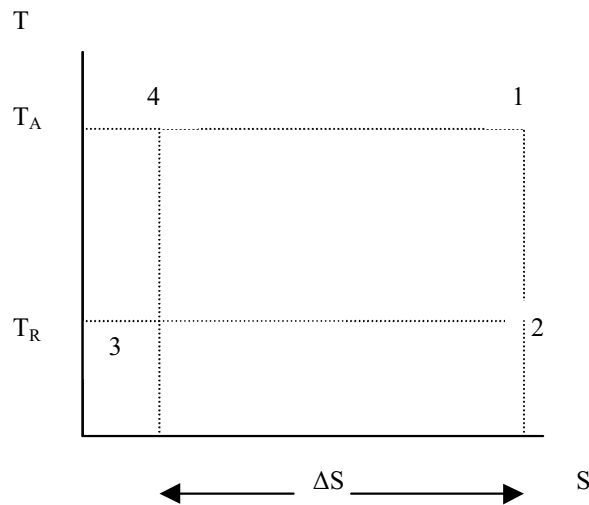


Figura 3.10 – Diagrama TS do ciclo de *Carnot*

O calor é adicionado (ΔQ_A) ao processo isotérmico 4 - 1 e rejeitado (ΔQ_R) no processo isotérmico 2 - 3. Os processos 1 - 2 e 3 - 4 representam a expansão e compressão isentrópica, respectivamente.

Por definição, em um ciclo reversível, $dQ = TdS$. Então, para o ciclo de *Carnot*:

$$\Delta Q_A = T_A (S_1 - S_4) = T_A \Delta S \quad (3.23)$$

$$\Delta Q_R = T_R \Delta S \quad (3.24)$$

A eficiência térmica (η_m) de qualquer ciclo termodinâmico é dada pela razão entre o trabalho realizado (ΔW_n) e o calor adicionado (ΔQ_A).

$$\eta_{th} = \frac{\Delta W_n}{\Delta Q_A} \quad (3.25)$$

Para o ciclo em questão:

$$\Delta W_n = \Delta Q_A - \Delta Q_R \quad (3.26)$$

Efetuada as equações 3.23 - 26, a eficiência térmica do ciclo de *Carnot* (η_C) é dada por:

$$\eta_C = \frac{(T_A - T_R)}{T_A} \quad (3.27)$$

O princípio de *Carnot* estabelece que esta é a máxima eficiência que pode ser obtida entre as temperatura T_A e T_R . Logo, deve ser o objetivo a ser atingido quando outros ciclos termodinâmicos são projetados. Existem algumas razões que impedem que essa eficiência (η_C) seja atingida e alguns métodos são propostos para atingí-la. Este ciclo é reversível, pois a transferência de calor da fonte quente para a fonte fria ocorre sem perdas, ou seja, $T_1 = T_A$ e $T_2 = T_R$, sendo assim, denominada reversibilidade externa. Outra característica de reversibilidade é a não existência de fricção do fluido no processo de expansão e compressão, a qual definida como reversibilidade interna.

Baseada na equação (3.27), a máxima eficiência é obtida com alta T_A , baixa T_R ou ambas condições. Ou seja, o calor adicionado deve estar na mais alta temperatura ou o rejeitado na menor temperatura possível. Entretanto, essas condições são inibidas pelos limites físicos dos materiais empregados nos reatores.

Em plantas nucleares do tipo PWR, geralmente, o ciclo de *Rankine* é empregado.

b - O ciclo de *Rankine*

Podemos exemplificar, de forma simplificada, uma planta nuclear na figura 3.11 e identificar o ciclo de *Rankine*.

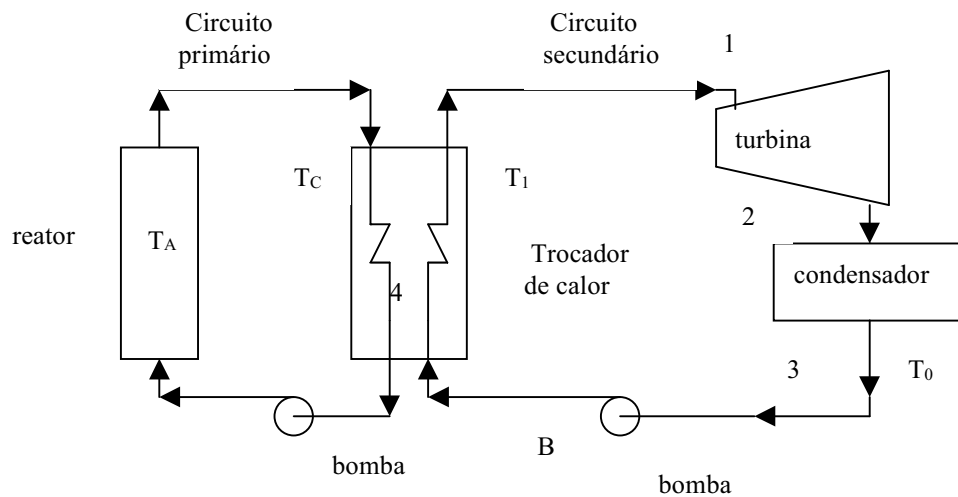


Figura 3.11 – Exemplo de uma planta nuclear

Na unidade representada na figura 3.11, vapor saturado à temperatura T_1 expande do ponto 1 (entrada da turbina), adiabaticamente e de forma reversível, na turbina até o ponto 2 (saída da turbina). No ponto 2, o vapor à temperatura T_2 , é condensado a temperatura e pressão constantes até o ponto 3. No ponto 3, o fluido no estado líquido saturado é bombeado para o ponto B, o qual apresenta a mesma pressão do ponto 1.

A eficiência de um ciclo básico de *Rankine* (η_R) é dada por:

$$\eta_R = \frac{[(h_1 - h_2) - (h_B - h_3)]}{(h_1 - h_B)} \quad (3.28)$$

Admitindo que o trabalho realizado pela bomba é muito pequeno quando comparado ao da turbina, podemos admitir que $h_B \approx h_3$. Logo:

$$\eta_R = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_3)} \quad (3.29)$$

A melhoria da eficiência de uma planta nuclear pode ser obtida através da melhor queima do combustível e, como consequência a redução do custo do combustível se a planta operar ao mesmo nível de potência, ou com a redução dos custos de operação se esta operar com maiores níveis de eficiência termodinâmica. Este fato também reduz a quantidade de calor rejeitado, contribuindo para a qualidade do meio ambiente. Abordadas estas questões, justificamos o esforço para desenvolver um trabalho com objetivo de aumentar a eficiência através do controle de operação do fluido de trabalho. A questão de extrema importância é a análise cuidadosa para estabelecer todas as variáveis que possam ser manipuladas para efeito de maximização da eficiência. Podemos reduzir a irreversibilidade do ciclo de *Rankine* oriunda da adição de calor sensível através da regeneração.

c - Ciclo de *Rankine* com regeneração

A figura 3.12 ilustra o ciclo de *Rankine* com regeneração ideal, no qual o líquido comprimido entre os pontos B e 4 recebe calor continuamente à mesma temperatura em que esteja. Isto pode ser realizado, hipoteticamente, usando o vapor na turbina, expandindo entre os pontos 1 e 2, com um agente contínuo de aquecimento para o líquido comprimido. Isto pode ser feito através do bombeamento do líquido comprimido através de um espaço anular, no caso da turbina, e em direção oposta ao fluxo do vapor, caracterizando um trocador de calor contra-corrente e, se sua

velocidade for baixa o suficiente ou se a área de transferência de calor for grande o necessário, a temperatura do vapor na face será a mesma do outro lado casco. Então, o fluido de trabalho receberá calor reversivelmente a partir do vapor em todo o caminho.

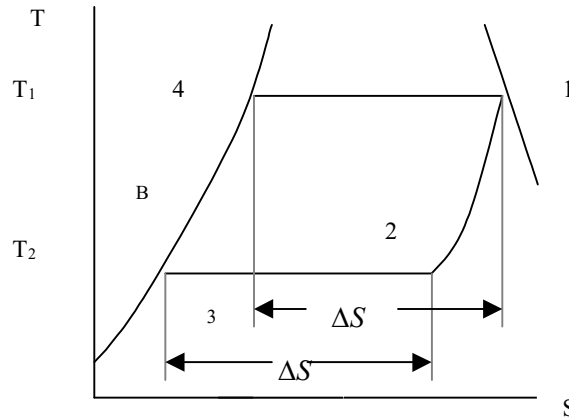


Figura 3.12 – Ciclo de *Rankine* com regeneração ideal

A eficiência do ciclo de *Rankine*, operando entre os mesmos limites de temperatura T_1 e T_2 , pode ser igual ao do ciclo de *Carnot*. Lembrando que a troca de calor entre o líquido comprimido e o vapor expandido ocorre internamente na turbina, este fenômeno não é considerado para o cálculo da eficiência. O calor transferido do vapor expandido é igual à área sob as linhas 1 – 2 e o calor adicionado ao líquido comprimido é igual à área sob a linha 3–4. Ambas áreas devem ser iguais (desprezando o calor perdido para a vizinhança). Então, $S_1 - S_4 = S_2 - S_3 = \Delta S$ e, a eficiência para um ciclo de *Rankine* Regenerativo (η_{RR}) é dada por:

$$\eta_{RR} = \frac{[(\text{calor adicionado}) - (\text{calor rejeitado})]}{(\text{calor adicionado})} = \frac{(T_1 \Delta S - T_2 \Delta S)}{T_1 \Delta S} \quad (3.30)$$

$$\eta_{RR} = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} \quad (3.31)$$

Esta regeneração ideal é difícil de se obter. Na prática, a regeneração é estabelecida através de extrações de pequenas frações de vapor na turbina e expansões em um ou mais pontos. O vapor extraído é empregado para o aquecimento do líquido comprimido. Aquecimento regenerativo tem o efeito de aumentar a eficiência do ciclo do fluido de trabalho. O grau ótimo de regeneração deve ser determinado após cuidadosas considerações dos efeitos no custo de capital, operação e de combustível. A expressão para a eficiência pode ser obtida através da análise termodinâmica do ciclo.

d – Exemplo de otimização de um circuito baseado em um ciclo de *Rankine* com regeneração

Para exemplificar o estudo que será desenvolvido, este item apresenta um exemplo de um circuito, simplificado, que representa um ciclo de *Rankine* com regeneração, ilustrado através da figura 3.13 e o diagrama T x S correspondente está representado na figura 3.14.

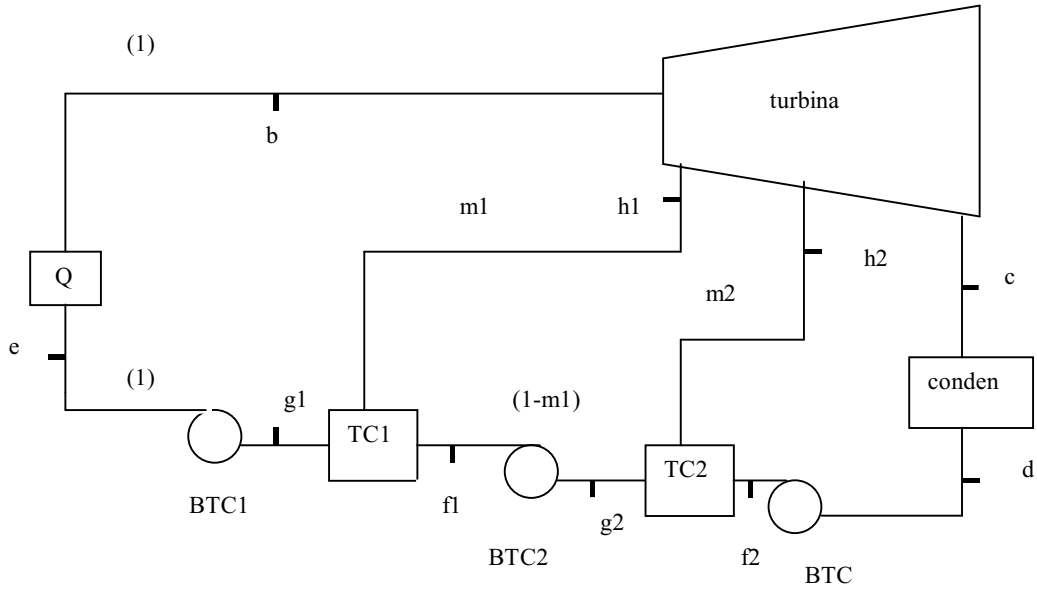


Figura 3.13 – Circuito representativo de um ciclo de *Rankine* Regenerativo

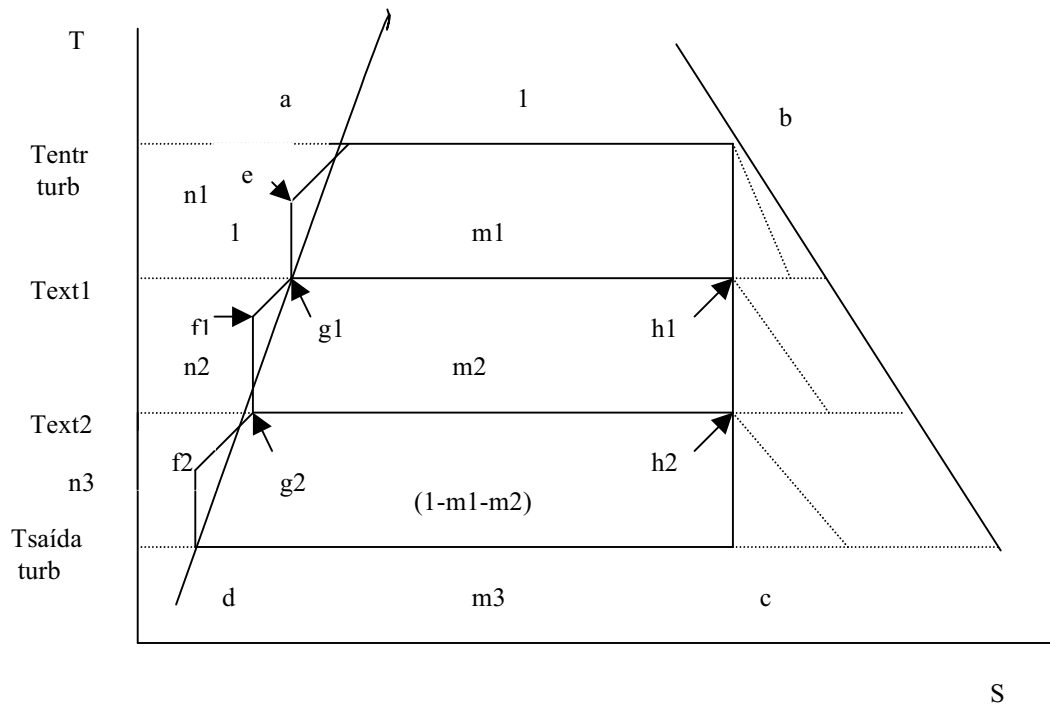


Figura 3.14 –Diagrama T x S do circuito representado na figura 3.13

Para o circuito apresentado na figura 10, temos:

$$1g_1 - m_1h_1 - (1 - m_1)f_1 = 0 \quad (3.32)$$

$$(1 - m_1)g_2 - m_2h_2 - (1 - m_1 - m_2)f_2 = 0 \quad (3.33)$$

Fazendo $(1 - m_1) = n_2$, a equação 3.29 torna-se:

$$n_2g_2 - m_2h_2 - (n_2 - m_2)f_2 = 0 \quad (3.34)$$

As equações 3.32 e 3.34 podem ser reescritas explicitando a vazão das extrações (m_i):

O índice i indica a i ésima extração.

$$m_1 = \frac{(g_1 - f_1)}{(h_1 - f_1)} \quad (3.35)$$

$$m_2 = n_2 \frac{(g_2 - f_2)}{(h_2 - f_2)} \quad (3.35)$$

Assim, verifica-se uma lei de formação e, para $k > 2$:

$$m_k = n_k \frac{(g_k - f_k)}{(h_k - f_k)} \quad \therefore k \rightarrow \text{número de extrações (pré - aquecedores)} \quad (3.37)$$

Explicitando o número de extrações a partir da equação 3.33:

$$n_k = 1 - \sum_{i=1}^{k-1} m_i \quad (3.38)$$

O cálculo do rendimento do ciclo é efetuado por um sistema de cálculo, o qual emprega a tabela ASME de propriedades termodinâmicas. A consistência deste programa foi verificada através do cálculo para um circuito hipotético com “infinitas” extrações

(2000 extrações) e foi verificado que o resultado atingido reproduz a eficiência do ciclo de *Carnot* (máxima eficiência para um ciclo termodinâmico).

O exemplo calculado para efeito de otimização consiste de um ciclo com 4 extrações.

O arquivo de dados com as condições iniciais fornece:

Temperatura de entrada na turbina

Temperatura de saída da turbina

Rendimento Turbina

Rendimento Bomba

Temperatura das extrações

Sendo a turbina e bomba irreversíveis

- Fluxograma de Otimização

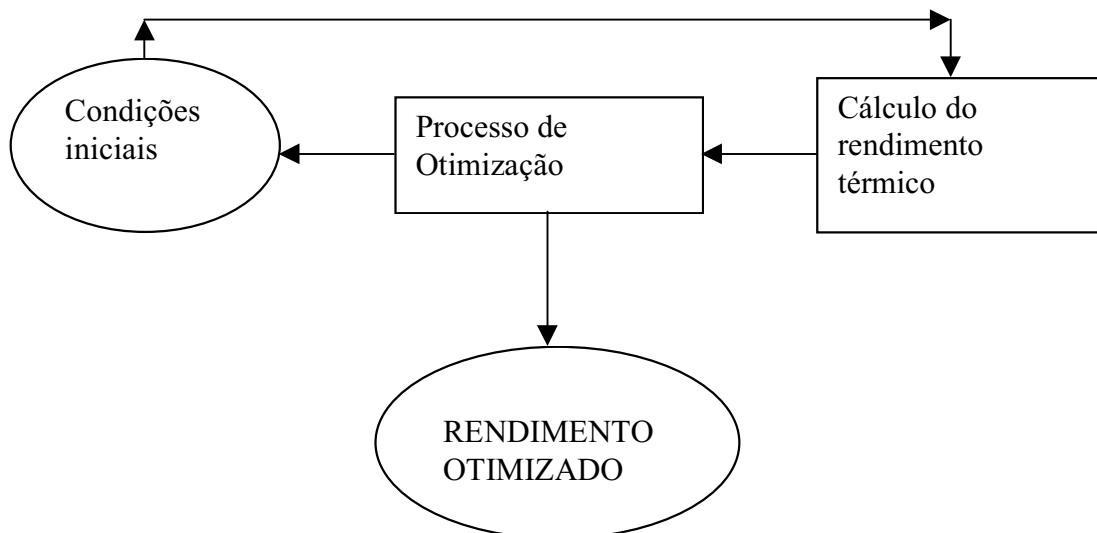


Figura 3.15 – fluxograma de otimização

- Resultado

Tabela 3.1 – Resultado da otimização de um ciclo de *Rankine* regenerativo com quatro extrações

Número da extração	Temperatura Extração (°F)	Rendimento não otimizado	Temperatura Extração otimizada (°F)	Rendimento otimizado
1	200.0	0.3854	487.2	0.4123
2	150.0		374.5	
3	100.0		264.1	
4	80.0		158.7	

Através desse exemplo, verificamos um aumento significativo da eficiência térmica, após otimização, do circuito hipotético analisado. Ressaltamos que, neste caso exemplo, o parâmetro otimizado foi a temperatura do fluido nas extrações da turbina. Neste trabalho, o parâmetro otimizado é a vazão das extrações.

CAPÍTULO 4. CONCEITOS BÁSICOS DE OTIMIZAÇÃO E ALGUMAS FERRAMENTAS

Neste capítulo será apresentado um breve e básico conceito de otimização, assim como algumas ferramentas disponíveis na literatura e, mais especificamente, as empregadas neste trabalho.

4.1 Introdução

Desde sempre é buscada a máxima eficiência para os processos que interferem na vida, assim como a própria natureza busca caminhos que encontrem a melhor resposta com o menor dispêndio de energia, ou seja, o menor custo. Observamos, no dia a dia, sempre a busca pela máxima eficiência, seja em projetos de engenharia ou na simples escolha de uma caminho para chegar a um determinado lugar, escolhendo dentre inúmeras opções.

Neste trabalho são empregadas uma técnica de otimização determinística e outra heurística. Apesar da técnica determinística demandar menor esforço computacional do que a heurística, fez-se necessário o emprego da segunda para validar os resultados da primeira e também para comparar os resultados obtidos neste trabalho com resultados apresentados em trabalhos anteriores por Rocha (2002) e Sacco (2002), os quais empregam técnicas heurísticas..

4.2 Otimização do rendimento térmico do circuito através do método determinístico

A rotina empregada para a otimização do circuito descrito no item 2.3, com 4 (quatro) extrações, está disponível na biblioteca matemática do compilador Fortran90 da Microsoft versão 4.0. É uma função denominada BCONG/DBCONG (single/double precision) a qual minimiza funções de N variáveis utilizando um método *quasi-Newton*. O funcional empregado para minimização, assim como o algoritmo da rotina está apresentada em *The Microsoft IMSL Libraries* do Microsoft Developer Studio (1994).

O sistema de cálculo termodinâmico é inicializado por um arquivo de dados com as condições iniciais de operação do circuito. Este sistema gera um arquivo de dados de saída, o qual alimentará o programa que otimiza a variável de interesse, neste caso, o rendimento térmico. Para este caso exemplo, a ferramenta de otimização, como já citada, é um método implementado na rotina BCONG, mas poderia ser implementado outro método de otimização. O programa de otimização gera um novo arquivo de condições iniciais que realimentará o programa de cálculo termodinâmico e, assim sucessivamente, até ser atingido a condição estabelecida como ótima. Finalizado o processo, são gerados dois arquivos com os resultados otimizados. Um arquivo com todas as condições operacionais necessárias para se obter o melhor rendimento térmico calculado e um outro com o histórico das interações efetuadas e o rendimento otimizado.

4.3 Processo de Otimização *Quasi-Newton*

Para os dois processos de otimização, busca dos parâmetros característicos do circuito e das condições operacionais que promovam o melhor rendimento térmico, foi empregada uma rotina para minimizar uma função de N variáveis utilizando o método *quasi-Newton*, descrito em Press (1996).

$$\min_{x \in \mathcal{R}^n} f(x) \quad (4.1)$$

sendo $f(x)$ uma função qualquer que se deseja minimizar, com

$f(x) : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}(n > 1)$ duas vezes diferenciável.

Gradiente de $f(x) : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}(n > 1)$, $x = (x_1, \dots, x_n)^T$, vetor de dimensão n .

$$\nabla f(x) = g(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} \\ \dots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix} = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^T \quad (4.2)$$

Equação iterativa do método de segurança de Newton

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha d^{(k)} \quad (4.3)$$

Neste trabalho $\alpha = 0,001$

$$G(x^{(k)})d^{(k)} = -g(x^{(k)}), \quad \text{para } k=1,2,\dots \quad (4.4)$$

O método *Quasi-Newton* emprega uma matriz aproximação à matriz *Hessiana* (ou à sua inversa) da função objetivo.

O emprego de uma matriz aproximação evita o cálculo da matriz *Hessiana* (segundas derivadas) que pode ser difícil de obter.

$H \rightarrow$ aproximação positiva à matriz *Hessiana* da função objetivo, operador definido em SAS (2004) e Gradshteyn (2000).

Sendo o operador Hessiano definido como uma matriz Jacobiana de derivadas parciais de uma função $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ com relação à x_1, x_2, \dots, x_n , como expressada na equação 4.5.

$$Hf(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_3} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_3} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_3} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

A aproximação à inversa da *Hessiana*, em vez da própria, substitui a resolução de um sistema linear em cada iteração, por um produto matriz vetor.

$$G(x)d = -g(x) \rightarrow d = -G(x)^{-1} g(x) \quad (4.6)$$

A matriz aproximação é atualizada em cada iteração usando a informação das derivadas (gradiente) da iteração anterior.

Observa-se que o algoritmo da rotina DBCONG (*IMSL Fortran 4.0*) empregado neste trabalho, oferece a liberdade de se utilizar a matriz Jacobiana de forma automática, mas com um intervalo de iteração fixo. Mas também possui a alternativa de se permitir empregar um sistema de cálculo externo. Assim, devido à necessidade do emprego de um intervalo de iteração menor do que o estabelecido na DBCONG, é efetuado o cálculo da matriz Jacobiana através de uma rotina independente, desenvolvida para esse sistema de cálculo. O intervalo de iteração nesta rotina independente é de $1,00E-03$ e emprega o cálculo do Jacobiano aproximado por Diferenças Finitas Avançadas.

4.4 Processo de Otimização por Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos (AG) propostos por Holland (1975) e posteriormente estudados por Goldberg (1989) e Gen (1997) são metodologias de otimização global baseadas filosoficamente numa metáfora com a teoria da evolução das espécies Darwin (1859), considerando aspectos como seleção natural, cruzamento, mutação, etc. Estes manipulam, durante o processo de busca, estruturas simbólicas que representam pontos (candidatos à solução) no espaço de busca. Os parâmetros da otimização são codificados numa cadeia de caracteres binária de acordo com os objetivos do problema. A estrutura binária contendo todos os parâmetros da otimização é denominada genótipo

daquele candidato à solução. Sua respectiva decodificação numérica ou simbólica, que faz sentido físico com o problema, denomina-se fenótipo do candidato. Um conjunto de genótipos compõe uma população de candidatos à solução. Tal população é manipulada através dos processos e operadores que caracterizam os algoritmos genéticos de forma que os indivíduos mais adaptados (melhor avaliação segundo a função objetivo do problema) tenham maior probabilidade de passar suas características adiante. Desta forma, de geração em geração, existe uma forte tendência de que os indivíduos mais adaptados passem às gerações futuras suas características, tornando-as, em média, mais adaptadas ao meio (espaço de busca). Este processo, repetido vez após vez, garante que a população como um todo evolua conjuntamente na direção de uma boa solução para o problema de otimização. Em 1975, Holland publicou *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, marco inicial dos Algoritmos Genéticos. Posteriormente, David E. Goldberg, seu aluno, nos anos 80, tornou-os populares ao obter seu primeiro sucesso em aplicação industrial.

Os Algoritmos Genéticos (AGs), empregam uma estratégia de busca paralela e estruturada, baseada em processos aleatórios e probabilísticos, guiada por pontos de alta aptidão, isto é, pontos nos quais a função a ser minimizada ou maximizada tem valores relativamente baixos ou altos. Assim sendo, a metáfora consiste em manter uma população de indivíduos (ou cromossomos), representando soluções candidatas para problemas concretos, que evolui ao longo do tempo (ou *gerações*) através de um processo de competição, onde os mais aptos (melhores adequabilidades) têm maiores chances de sobreviver e se reproduzir. A reprodução se baseia em um processo de

seleção de indivíduos e modificação das soluções candidatas que eles representam, através de operadores tais como cruzamento (ou recombinação) e mutação. Este processo repete-se iterativamente, até que algum critério de parada seja atingido.

Os AGs, de uma forma geral, têm certas características que os diferem dos métodos tradicionais de busca, que são:

- AGs não trabalham diretamente com os parâmetros do problema e sim num espaço de soluções codificadas;

- Ao invés de empregar regras determinísticas, AGs usam regras estocásticas (operadores genéticos são aplicados aleatoriamente aos cromossomos da população) sobre um conjunto de soluções, diversificando a busca;

- Operam numa população (conjunto) de pontos, e não a partir de um ponto isolado, desta forma diminuem o risco de apresentar como solução um extremo local;

- Não necessitam de informações adicionais, como derivadas ou o conhecimento do espaço de busca, pois trabalham apenas com os valores das funções objetivo de cada cromossomo. Sendo esta característica a maior motivação para o emprego desta ferramenta para avaliar o processo de otimização, em concorrência com o método determinístico de *Quasi-Newton*, pois não se conhece o espaço de busca gerado pelas variáveis otimizadas no problema em questão.

Uma estrutura básica de AGs denominada algoritmo genético conceitual, canônico ou genérico segundo Castro (2001) é apresentada na figura 4.2:

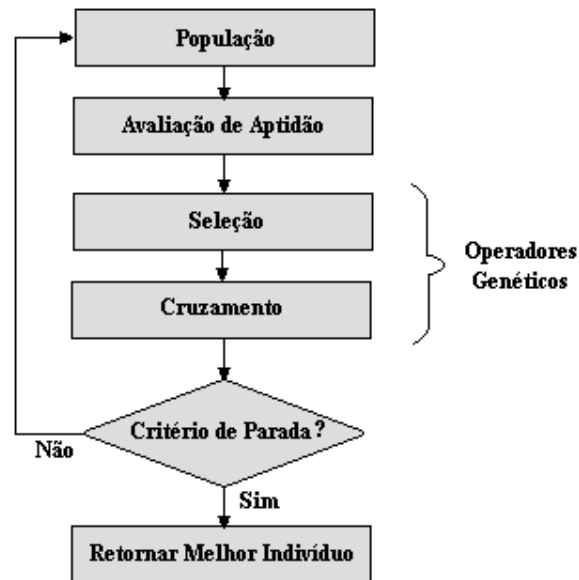


Figura 4.2 - Estrutura básica de um Algoritmo Genético

- POPULAÇÃO INICIAL

A população de um AG é o conjunto de indivíduos que estão sendo cogitados como solução e que serão usados para criar o novo conjunto de indivíduos para análise. Esta população é gerada aleatoriamente, e eventualmente pode ser vantajoso utilizar algum tipo de heurística que acrescente alguns indivíduos sabidamente bem avaliados ou definir uma distância mínima entre cromossomos.

- AVALIAÇÃO DA POPULAÇÃO

Segundo Pacheco (1999) a avaliação é o elo entre os AGs e o mundo externo. A avaliação é feita através de uma função que melhor represente o problema e tenha como

objetivo fornecer uma medida de aptidão de cada indivíduo na população atual, dirigindo assim o processo de busca.

- SELEÇÃO

O processo de seleção está intimamente ligado ao princípio de sobrevivência dos indivíduos mais aptos, ou seja, cromossomos com melhor aptidão ou adequabilidade tem maior probabilidade de serem copiados. O operador seleção é um componente fundamental no processo evolucionário, existindo na literatura cinco principais mecanismos de seleção: proporcional, por torneio, com truncamento, por normalização linear, por normalização exponencial .

O método de seleção da roleta proporcional à aptidão (*fitness*) proposto por Goldberg (1989) é o mais referido na literatura sobre AGs e o que está normalmente associado ao AG canônico, é exemplificado pela Figura 4.3. Neste método, cada indivíduo da população é representado proporcionalmente ao seu índice de aptidão.

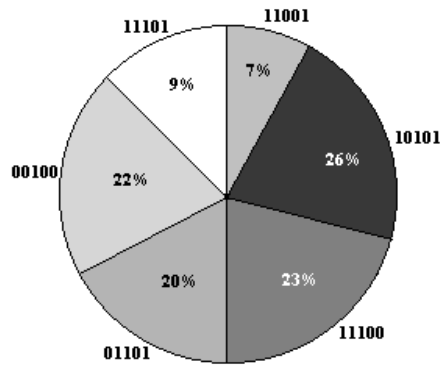


Figura 4.3 - Método de Seleção por Roleta proporcional à aptidão

Uma possível implementação para quantificar a probabilidade do i -ésimo cromossomo de uma população a ser selecionado é

$$p_i(t) = \frac{f_i(t)}{\sum_{i=1}^n f_i(t)} \quad (4.6)$$

A convergência prematura é o principal inconveniente dos AGs, causada pela redução da diversidade genética das populações, visto que a pressão seletiva elevada origina com maior frequência indivíduos de maior mérito para eventos de reprodução. Desta maneira, após sucessivas gerações, a população será constituída por cromossomos muito semelhantes a estes indivíduos, que nestas circunstâncias passam a ser conhecidos por super-indivíduos. As soluções não evoluem, uma vez que os pais sendo semelhantes, originam filhos com características idênticas. Nestas condições, a diversidade genética decresce rapidamente para níveis que impossibilitam uma exploração conveniente do espaço de busca. Assim, efetua-se uma transformação

proporcional para que, através de uma normalização entre os indivíduos semelhantes, possam ser bem representadas as suas diferenças com o objetivo de reduzir o decaimento da diversidade genética dos indivíduos.

Assim sendo e, dadas as características deste trabalho, ou seja, resultados muito próximos, o processo de seleção adota o processo de seleção com transformação proporcional.

- REPRESENTAÇÃO E CODIFICAÇÃO

Existem inúmeras formas de representação das variáveis do problema, sendo os tipos normalmente utilizados são:

- Números binários, números binários codificando números reais, números binários codificando números inteiros, vetores, matrizes, etc.

Por exemplo, um binário pode representar um número real compreendido entre os valores mínimos e máximos do espaço de busca com precisão de p casas decimais. Para isso são necessários K bits, calculados pela inequação:

$$2^K \leq (X_{\text{máx}} - X_{\text{min}}) \cdot 10^p \quad (4.7)$$

Neste trabalho, a codificação é feita através de números binários.

- DECODIFICAÇÃO

A decodificação do cromossomo permite que as seqüências codificadas sejam mapeadas de volta ao espaço de busca. Um cromossomo que tenha sido codificado através de um código binário terá sua decodificação para o real de acordo com a seguinte formulação:

$$X_R = X_B \cdot \frac{|X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}|}{2^L - 1} + X_{\text{mín}} \quad (4.8)$$

$$\text{passo} = \frac{|X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}|}{2^L - 1} \quad (4.8)$$

onde

$X_R \in [X_{\text{máx}}, X_{\text{mín}}]$ - número real

X_B - valor discreto ou inteiro

L - comprimento do cromossomo

O tamanho estabelecido, para o cromossomo, neste trabalho é de 7 bits. Assim, tem-se:

Para $L = 7$

$$X_{\text{máx}} = 1,10$$

$$X_{\text{mín}} = 0,90$$

$$\text{Resolução} = 0,00157$$

- CRUZAMENTO

É um processo de reprodução em que ocorre troca de informação genética contida em dois indivíduos (pais) para gerar um novo indivíduo (filho). Os indivíduos pais foram escolhidos como os mais aptos no processo de seleção.

O processo de cruzamento, de acordo com Oliveira (2001), não acrescenta novas informações à população, por explorar apenas a região próxima aos indivíduos pais. O cruzamento pode ser feito de diversas maneiras, SENDO as mais empregada:

Cruzamento em um ponto – um ponto na cadeia de caracteres dos pais é escolhido aleatoriamente para que as informações genéticas sejam trocadas.

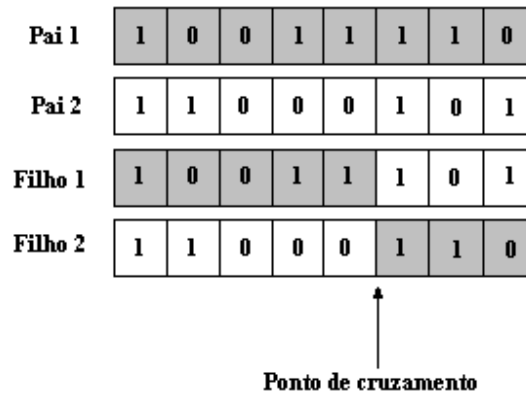


Figura 4.4 - Exemplo de cruzamento em um ponto

Cruzamento multiponto proposto por Goldberg (1989) – é uma generalização do conceito de troca de informação genética onde vários pontos dos indivíduos pais são escolhidos aleatoriamente. Este tipo de cruzamento mantém a diversidade genética das populações em níveis mais elevados mas podem destruir com mais frequência boas seqüências genéticas.

O AG empregado neste trabalho apresenta cruzamento de dois pontos

- MUTAÇÃO

Este operador é responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética na população. A mutação trabalha alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida entre a descendência logo após o cruzamento.

Indivíduo	1	0	0	1	1	1	1	0
Indivíduo Mutado	1	0	0	1	0	1	1	0

Figura 4.5 - Exemplo de mutação

Desta forma a mutação fornece meios para a introdução de novos elementos na população, assegurando que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca seja zero. Esta característica permite controlar problemas de ótimos locais. O operador de mutação também permite a recuperação de material genético perdido durante a evolução das gerações. Além desse fato, torna-se um mecanismo intensificador de busca na vizinhança da solução quando introduz apenas um ruído à solução contida no indivíduo.

- CRITÉRIOS DE PARADA

Em se tratando de problemas de otimização, o ideal seria que o algoritmo terminasse assim que o ponto ótimo fosse encontrado. No caso de funções multimodais,

um ponto ótimo pode ser suficiente, mas pode existir situações onde todos ou o maior número possível de pontos ótimos sejam desejáveis. Um problema prático é que, na maioria dos casos de interesse, não se pode afirmar com certeza se um dado ponto ótimo corresponde a um ótimo global. Como consequência, normalmente usa-se o critério do número máximo de gerações ou um tempo limite de processamento para parar o AG. Outro critério razoável é parar o AG usando a idéia de estagnação, ou seja, quando não se observa melhoria depois de várias gerações consecutivas descrito por Tanomaru (1995).

Observando os resultados de otimização apresentados pelo AG neste trabalho, o critério de parada adotado foi o de estagnação, pois após várias gerações o valor se manteve o mesmo. Como exemplo, podemos dizer que, em muitos casos simulados, o processo de busca foi interrompido em torno de 500 gerações. Sendo que, o valor ficou alterado na, aproximadamente, 80^a – 90^a geração. A tabela 4.1 apresenta os parâmetros do AG empregados neste trabalho.

Tabela 4.1 - Parâmetros, deste trabalho, do AG

PARÂMETRO	VALOR ADOTADO*
Semente	1, 6, 10, 50
Tamanho da população	80, 200
Taxa de cruzamento	0,6
Taxa de mutação	0,005
Resolução	0,00157

*Foram realizados vários testes com esses parâmetros combinados, mas apenas alguns resultados são apresentados no capítulo de resultados devido à consistência dos mesmos e pelo fato de ser um número muito grande de testes.

4.5 Implementação do problema

O ciclo termodinâmico do circuito analisado corresponde a um ciclo do tipo Rankine com reaquecimento e regeneração. Para efeito de busca das melhores condições operacionais para obtenção da melhor eficiência térmica, as variáveis de otimização passam a ser as extrações nas turbinas e o desvio de vapor vivo, antes da entrada de vapor na turbina de alta pressão, para alimentar o reaquecimento do fluido de trabalho antes de entrar na turbina de baixa pressão. São 5 extrações nas turbinas, uma na turbina de alta pressão e quatro na turbina de baixa pressão, e uma divisão de vapor totalizando seis variáveis de busca para otimização do rendimento térmico. Quando são otimizadas 6 variáveis, ou seja, otimizando a extração de vapor vivo, o espaço de busca gerado é mais complexo. Estas variáveis foram escolhidas por influenciarem na eficiência do ciclo do circuito e por apresentarem a possibilidade operacional de alterá-las.

Com a ferramenta de otimização que emprega o método de *quasi-Newton*, pode-se obter resultados de máximo local. Assim, faz-se necessário empregar uma ferramenta de otimização mais eficiente neste caso, e se optou por **Algoritmo Genético** por este apresentar a característica de apresentar menor possibilidade de indicar um máximo local como resultado final. O programa de Algoritmo Genético utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Pereira (2000).

CAPÍTULO 5 . ESTRUTURA DO SISTEMA DE CÁLCULO DO RENDIMENTO TÉRMICO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através do sistema de cálculo de balanço térmico e comparados com valores de referência, com o objetivo de mostrar a consistência do sistema.

5.1 – Resultados do programa de balanço térmico

O programa computacional desenvolvido e apresentado por Lapa (2005), efetua o balanço térmico do circuito secundário da usina nuclear Angra 2 para qualquer nível de potência especificado pelo usuário. É empregado, para este cálculo, um conjunto de dados para quatro níveis de potência (25 %, 50 %, 75 % e 100 %) que corresponde às condições termodinâmicas do fluido de trabalho (água no estado vapor saturado / superaquecido) ao longo do circuito, traduzidas sob forma de pressão, temperatura, título e vazão mássica. Assim, esse programa executa as seguintes tarefas:

- (a) obtenção das propriedades térmicas em níveis de potência conhecidos a partir do cálculo térmico para o ciclo nestes níveis;

- (b) determinação das propriedades dependentes de parâmetros de operação e interpolação das propriedades térmicas para o nível de potência especificado pelo usuário;

(c) cálculo do balanço térmico para o nível de potência especificado pelo usuário, a partir das propriedades obtidas na etapa anterior. Esta etapa caracteriza a peculiaridade deste sistema de cálculo ser cativo ao circuito descrito. Este é um diferencial com relação aos programas comerciais que se baseiam em modelos de componentes pré-definidos, inserindo desvios nos cálculos que podem comprometer a qualidade do resultado final;

(d) obtenção de um rendimento otimizado através do uso de um algoritmo de otimização que opera variações das vazões de extração e da vazão direcionada para o pré-aquecedor da turbina de baixa pressão.

A consistência dos resultados do programa quanto ao cálculo do rendimento térmico pode ser verificada através da figura 5.1 e da tabela 5.1. Nestes são apresentados os resultados do rendimento térmico comparado com os rendimentos típicos de uma usina nuclear do tipo Angra 2.

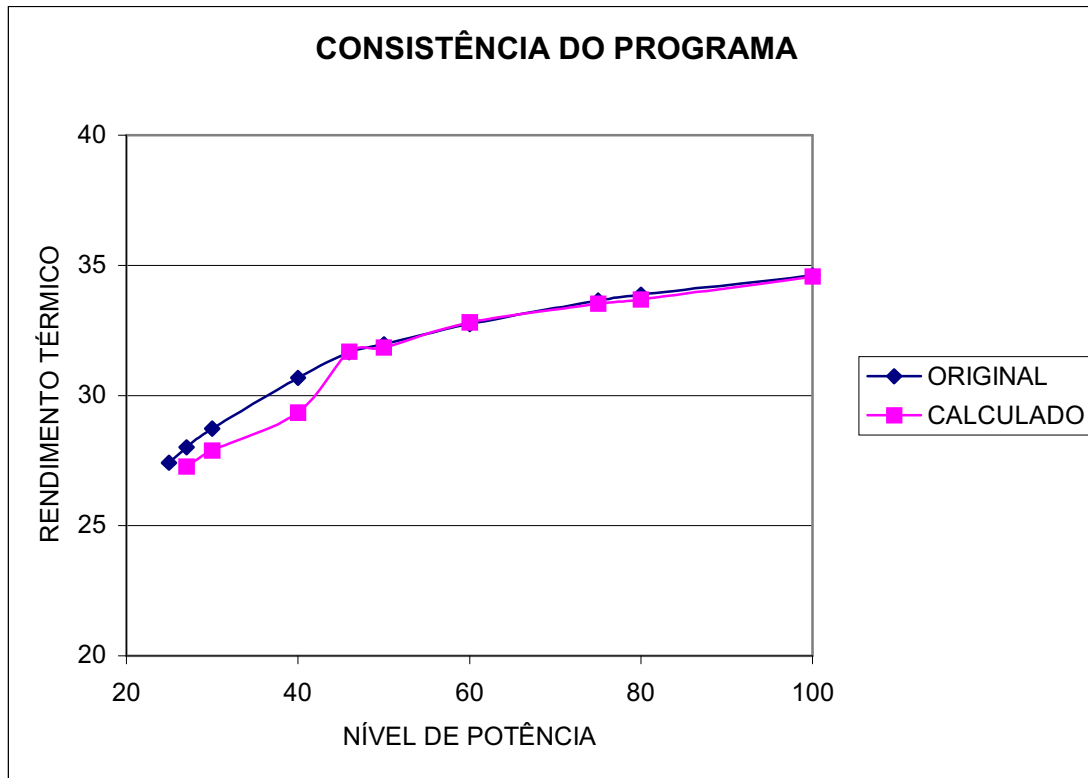


Figura 5.1- Gráfico com os rendimento térmico calculado e com os rendimentos típicos de uma usina nuclear do tipo Angra 2
 Coeficiente de Correlação¹ = 0.991352954

¹ O coeficiente de correlação determina a relação entre dois conjuntos de dados, expressando a aderência entre os mesmos. Quanto mais próximo ao valor 1,0, mais próximos estão os dois conjuntos de dados entre si.

Tabela 5.1 – Rendimento térmico original (típico) e rendimento térmico calculado pelo programa de cálculo de balanço térmico

POTÊNCIA DE OPERAÇÃO (%)	RENDIMENTO ORIGINAL TÍPICO	RENDIMENTO CALCULADO	ERRO RELATIVO
100	34,62	34,58	0.0012
80	33,87	33,69	0.0054
75	33,64	33,52	0.0035
60	32,75	32,80	-0.0015
50	31,96	31,85	0.0033
46	31,67	31,67	-0.0001
40	30,67	29,35	0.0429
30	28,73	27,88	0.0293
27	28,02	27,28	0.0263

O coeficiente de correlação apresenta um valor que corrobora a reprodução dos valores de referência através do cálculo efetuado pelo programa desenvolvido neste trabalho. Ao observarmos o gráfico, verificamos uma pequena distorção entre os resultados para níveis de potência de operação abaixo de 40 %. Lembramos que, para níveis baixos de potência, há desvios no caminho do fluido de trabalho devido a condições de operação dos componentes. Os valores de referência não consideraram esses caminhos, apenas foram determinados através de um cálculo de balanço térmico considerando o caminho principal do fluido de trabalho, desconsiderando qualquer

particularidade em função do nível de potência de operação. Entretanto, o programa desenvolvido com o objetivo de ser o mais fiel possível ao processo, atendendo às peculiaridades do mesmo, incorpora os devidos desvios de vapor e fontes alternativas de vapor (vapor auxiliar), que são típicos para baixos níveis de potência, obtém valores com uma discrepância maior quando comparados com os valores de referência. Este fato não invalida a consistência e robustez do programa, mas destaca a importância do seu desenvolvimento com suas características cativas ao circuito analisado.

Podemos concluir que o programa é consistente e deve ser empregado para o cálculo da eficiência térmica otimizada.

CAPÍTULO 6 . RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e esses analisados com base no comportamento termodinâmico do ciclo. Ao final, é apresentada a conclusão deste trabalho.

6.1 Resultados otimizados com 5 variáveis

A figura 6.1 apresenta os resultados do rendimento otimizados, empregando as ferramentas de otimização que têm como base o método *Quasi-Newton* e o Algoritmo Genético, otimizando 5 variáveis (uma extração da turbina de alta pressão e quatro extrações da turbina de baixa pressão), para diversos níveis de potência de operação.

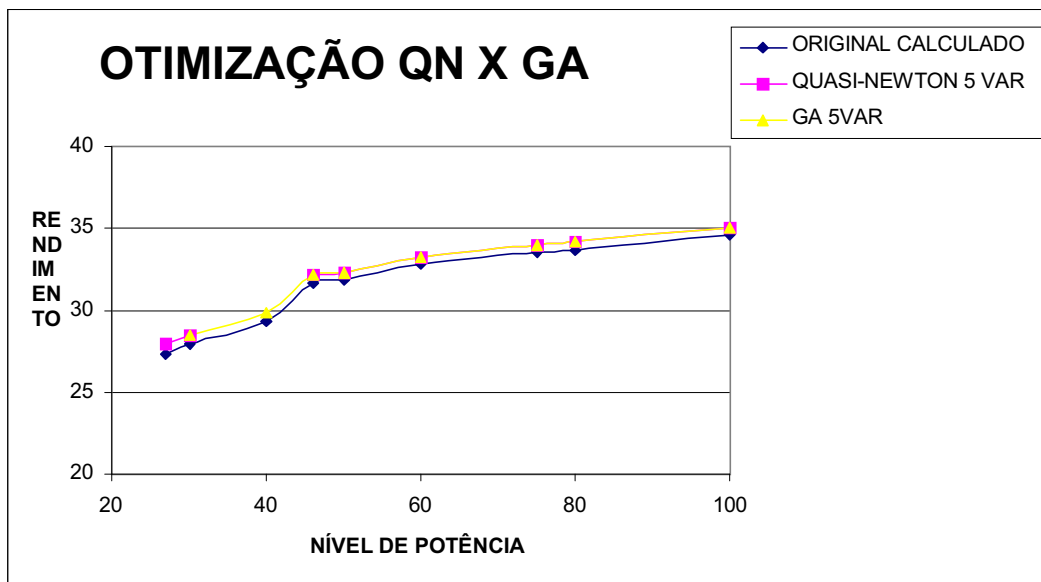


Figura 6.1 – nível de potência x rendimento térmico otimizado (calculado, otimizado *Quasi-Newton*, Algoritmo Genético) para 5 variáveis otimizadas

Os resultados listados nas tabelas 6.1 e 6.2 são para níveis de potência superiores à 40 %. Logo, não é explicitada a maior diferença entre os valores de referência e os calculados que se verifica na figura 5.1 para essa faixa de potência. Isto se deve ao fato que decidiu-se efetuar otimização para níveis de operação historicamente mais comuns. Mas o sistema de cálculo pode efetuar otimizações a partir de 25 % de nível de potência de operação. Os valores de rendimento não otimizados, apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2 são o valores de referência para a operação da usina sem otimização.

Tabela 6.1 – Resultados otimizados para 5 variáveis obtidos através das ferramentas de *Quasi-Newton* e Algoritmo Genético

POTÊNCIA DE OPERAÇÃO (%)	RENDIMENTO TÉRMICO CALCULADO SEM OTIMIZAÇÃO	RENDIMENTO TÉRMICO OTIMIZADO POR QN	RENDIMENTO TÉRMICO OTIMIZADO POR GA	VARIAÇÃO DO RENDIMENTO (%)
100	34,58	35,06	35,06	1,39
80	33,69	34,17	34,17	1,42
75	33,52	34,00	34,00	1,43
60	32,80	33,25	33,25	1,37
50	31,85	32,32	32,32	1,47
46	31,67	32,15	32,15	1,51
40	29,35	29,88	29,88	1,81

Faz-se necessário observar que a busca do resultado otimizado empregando GA foi realizada com mais de 5 sementes diferentes e também para diversos números de população.

Analisando os resultados obtidos a partir da otimização das cinco extrações das turbinas (uma na TAP e quatro na TBP), é evidente a necessidade do processo de otimização para níveis de potência de operação inferiores a 100 %, pois não somente aumenta-se em torno de 1,5 % o rendimento térmico, como também o trabalho mostra que quanto menor o nível de operação maior o aumento da eficiência, quando aplicado o processo de otimização. Logo, como nossas usinas, de forma particular, operam em níveis baixos de potência, faz necessário o ajuste nos parâmetros operacionais para se obter um maior rendimento térmico.

Os resultados atingidos através do GA convergiram para o mesmo valor otimizado de rendimento térmico, mesmo com a variação do número de população e da semente, sendo idênticos aos obtidos pela ferramenta QN. O critério de parada utilizado foi o a partir da observação do valor não sofrer modificação após um número (~ 500) de gerações. Deste modo, podemos dizer que este é um forte indicativo que este é o resultado que representa o ótimo global.

6.2 Resultados otimizados com 6 variáveis

A figura 6.2 apresenta os resultados do rendimentos otimizados, empregando a ferramenta de otimização que tem como base o método *Quasi-Newton* e o Algoritmo Genético, otimizando 6 variáveis (uma extração da turbina de alta pressão, quatro extrações da turbina de baixa pressão e o desvio de vapor vivo para superaquecimento

do fluido de trabalho antes de entrar na TBP), para diversos níveis de potência de operação.

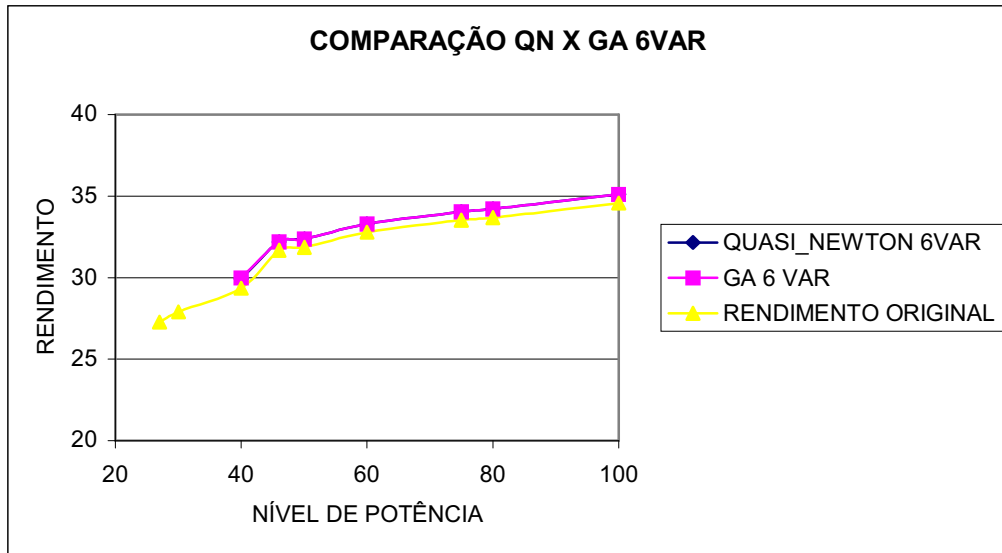


Figura 6.2 – nível de potência x rendimento térmico otimizado (calculado, otimizado *Quasi-Newton*, Algoritmo Genético) para 6 variáveis otimizadas

Tabela 6.2 – Resultados otimizados para 6 variáveis obtidos através das ferramentas de *Quasi-Newton* e Algoritmo Genético

POTÊNCIA DE OPERAÇÃO (%)	RENDIMENTO TÉRMICO CALCULADO SEM OTIMIZAÇÃO	RENDIMENTO TÉRMICO OTIMIZADO POR QN	RENDIMENTO TÉRMICO OTIMIZADO POR GA	VARIAÇÃO DO RENDIMENTO (%)
100	34,58	35,11	35,11	1,53
80	33,69	34,22	34,22	1,57
75	33,52	34,05	34,05	1,58
60	32,80	33,30	33,30	1,52
50	31,85	32,37	32,37	1,63
46	31,67	32,20	32,20	1,67
40	29,35	29,98	29,98	1,11

Observando a figura 6.2 e a tabela 6.2, os resultados vêm a corroborar a hipótese apresentada por Rocha (2002) que otimizando um maior número de variáveis, relevantes à melhoria da eficiência térmica, obtém-se um gradiente maior no aumento da eficiência térmica.

Tabela 6.3 – comparação das extrações, obtidas na otimização a partir da ferramenta QN e GA, na faixa de busca pesquisada

POTÊNCIA (%)	VAZÃO MÁSSICA (normalizada)	5 VARIÁVEIS		6 VARIÁVEIS	
		QN	GA	QN	GA
100	EXTRAÇÃO 1	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 2	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 3	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 4	0.9	0.9	0.9	0.9
	EXTRAÇÃO 5	0.9	0.9	0.9	0.9
	DIVISÃO	1.00	1.0	1.01	1.01
80	EXTRAÇÃO 1	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 2	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 3	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 4	0.9	0.9	0.9	0.9
	EXTRAÇÃO 5	0.9	0.9	0.9	0.9
	DIVISÃO	1.00	1.0	1.01	1.01
75	EXTRAÇÃO 1	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 2	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 3	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 4	0.9	0.9	0.9	0.9
	EXTRAÇÃO 5	0.9	0.9	0.9	0.9
	DIVISÃO	1.00	1.0	1.01	1.01
60	EXTRAÇÃO 1	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 2	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 3	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 4	0.9	0.9	0.9	0.9
	EXTRAÇÃO 5	0.9	0.9	0.9	0.9
	DIVISÃO	1.00	1.0	1.01	1.01
50	EXTRAÇÃO 1	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 2	1.1	1.1	1.1	1.1
	EXTRAÇÃO 3	1.0	1.0	1.0	1.0
	EXTRAÇÃO 4	0.9	0.9	0.9	0.9
	EXTRAÇÃO 5	0.9	0.9	0.9	0.9
	DIVISÃO	1.0	1.0	1.01	1.01

VARIAÇÃO DE 10 % DAS VAZÕES DA VARIÁVEIS (condição de segurança operacional)

A tabela 6.3 apresenta o valor das extrações, normalizados para uma faixa de $\pm 10\%$ de busca de otimização.

Quanto aos resultados obtidos pela otimização por QN e por AG convergirem para um mesmo valor e mesma distribuição de vazão mássica de extração apresentada na tabela 6.3, demonstra que o espaço de busca, mesmo com a presença da sexta variável (desvio de vapor vivo na saída do GV), é bem comportado, sendo um forte indício de que possua um máximo global possível de ser atingido.

Apesar dos resultados de ambas técnicas de otimização, convergirem para um mesmo valor, não se pode descartar os resultados obtidos pelo AG (ferramenta dispendiosa em termos computacionais), pois não se conhecendo o espaço de busca, este fato é um forte indicativo de que os resultados otimizados correspondam ao ótimo global. Ou seja, a técnica determinística é satisfatória para solucionar o problema, fato este validado pela técnica de AG empregada.

6.3 Comparação dos resultados com outros trabalhos

Os trabalhos com os quais os resultados obtidos serão comparados são os de Rocha (2002) e Sacco (2002), os quais apresentam problemas semelhantes.

Na tabela 6.4 são apresentados os resultados obtidos por Rocha (2002) e os destes trabalho. Rocha admitiu uma dependência linear entre os parâmetros

termodinâmicos e não considerou os desvios de vapor no circuito em função do nível de potência de operação. Neste trabalho, essas considerações foram admitidas e, assim, podemos justificar um resultado superior ao obtido neste trabalho.

Tabela 6.4 – comparação entre os resultados obtidos por Rocha (2002) e neste trabalho

Nível de potência de operação (%)	Rendimento não otimizado (Ref. 1)	Rendimento otimizado (Ref. 1)	Rendimento não otimizado (Ref. 2)	Rendimento otimizado (Ref. 2)
87,6	34,84	36,91	33,95	35,62
58,4	33,50	35,68	32,69	34,27
29,2	30,50	33,68	27,70	29,31

Ref. 1 – Rocha (2002)

Ref. 2 – este trabalho

A tabela 6.5 mostra os resultados obtidos por Sacco (2002) e por este trabalho. Faz-se necessário Lembrar que Sacco otimizou o circuito para apenas 100 % de nível de potência e empregou um sistema de cálculo comercial para o balanço térmico e empregou a técnica de AG para o processo de otimização. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de cálculo cativo ao circuito e foram empregadas duas técnicas de otimização, inclusive o AG. Além dos resultados obtidos neste trabalho serem melhores, observa-se que os resultados obtidos pela técnica AG e *Quasi-Newton* são idênticos. Logo, devido ao dispêndio computacional, é mais indicado o uso da técnica de *Quasi-Newton* para este problema de otimização. Também ressalta-se que o fato de utilizar um sistema de cálculo desenvolvido para este trabalho permite conhecimento da distribuição de erros do mesmo.

Tabela 6.5 - comparação entre os resultados obtidos por Sacco (2002) e neste trabalho

Nível de potência de operação (%)	Rendimento não otimizado (Ref. 1)	Rendimento otimizado (Ref. 1)	Rendimento não otimizado (Ref. 2)	Rendimento otimizado (Ref. 2)
100,0	34,5	35,13	33,95	34,99

Ref. 1 - Sacco (2002)

Ref. 2 – este trabalho

6.4 Conclusão

Podemos concluir, baseados nos resultados apresentados, que se pode obter um rendimento térmico otimizado através da variação dos parâmetros operacionais que interferem nas variáveis termodinâmicas que influenciam no rendimento do ciclo termodinâmico que rege o circuito analisado. Destaca-se que não há necessidade de mudança de equipamento, atendendo as condições de segurança exigidas para a operação de uma usina nuclear.

Assim, este trabalho atende à proposta inicial e, também, confirma as hipóteses apresentadas pelos trabalhos preliminares anteriormente desenvolvidos.

Lembramos que apesar dos modelos físicos empregados no programa de cálculo termodinâmico serem, relativamente simples, faz-se necessário destacar que é um programa cativo ao circuito analisado, oferecendo, possivelmente, resultados mais próximos da realidade quando comparados aos resultados obtidos a partir de programas comerciais que empregam modelos genéricos, apesar de mais complexos. Quanto à questão de modelos físicos mais detalhados, pode ser considerada uma sugestão de

melhoria para o trabalho no futuro, com o objetivo de verificar se os resultados possam melhorar. A incorporação de modelos mais rigorosos não oferece garantia de melhoria na obtenção de pontos ótimos melhores. Os modelos simples adotados apresentaram uma distribuição uniforme de erros, sendo esta um forte indício da ótima qualidade do sistema de cálculo. Mesmo assim, a incorporação de modelos mais complexos não oferece dificuldade devido à característica modular do programa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ávila, S. L., Lima, C. B., Capes Jr., W. P., *Conceitos Básicos, Ferramentas e Aplicações*, Revista de Automação e Tecnologia da Informação, vol.2, n.1 janeiro – junho 2003,

Bravo, H. A. A., 2001 - *Aplicação do Algoritmo Simulated Annealing ao Problema de Localização Capacitado, Usando o Teste de Redução* - Tese de D. Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

CNEN-NN-1.14, *Relatório de Operação de Usinas Nucleares*, Resolução N°016 29/11/2001, Publicação D.O U. 10/01/2002

Castro, R. E., 2001, *Otimização de Estruturas com Multi Objetivos Via Algoritmos Genéticos*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Chen, L., Li, Y., Sun F., Wu C., *Power Optimization of Open-Cycle Regenerator Gas-Turbine Power Plants*, Applied Energy, Elsevier, vol. 78, p. 199-218, 2004

Cunha, J. J., 2004, *Projeto em Escala Reduzida do Núcleo de um Reator PWR em Regime de Circulação Natural Otimizado por Algoritmo Genético*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Darwin, C., 1859, *The Origin of Species by Means of Natural Selection*, London, John Murray

Delhaye, J.M. Giot, M. & Riethmuller, M.L., 1981 - *Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering* - McGraw-Hill Book Company Eds

ELETRONUCLEAR, *Final Safety Analysis Report – Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Unit 2*. ELETRONUCLEAR S. A., Rev. 9, January 2005

ELETRONUCLEAR, disponível em <http://eletronuclear.gov.br>, acessada em 10/2005

El-Wakil, M. M. , 1971 – *Nuclear Energy Conversion* – International Textbook company

Futuro, F. L.; Silva, C. D.; Muniz, ^a L.; Ogando, A. F. , 1999 – *Detecção de Perdas na Geração Eletronuclear: Simulação do Circuito Água-Vapor de Angra 1* – XV SNPTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GPT/05 Relatório Anual de Operação - Angra 1 - RAO – Eletronuclear, 2001

Gen, M. E, Cheng, R., 1997, *Genetic Algorithms & Engineering Design*, New York, Wiley

Goldberg, D. E., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, New York, Addison-Wesley

Gradshteyn, I. S. and Ryzhik, I. M., *Hessian Determinants §14.314 in Tables of Integrals, Series, and Products*, 6th ed. San Diego, CA: Academic Press, p. 1069, 2000

Holland, J. H., 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Na Arbor, University of Michigan

Vieira, L. S., Donatelli, J. L., Cruz M. E., 2004, *Integration of an iterative methodology for exergoeconomic improvement of thermal system with a process simulator*, Energy Conversion and Management, vol 45, pag. 2495-2523, Elsevier.

Lapa, S. N., *Um Novo Algoritmo Computacional para Análise termohidráulica de Plantas Industriais*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998

Lapa, N. S., Alvim, A. C. M., Martinez, A. S., *Otimização da Eficiência Térmica de uma Usina Nuclear do /tipo Pressurized Water Reactor*, International Nuclear Atlantic conference – INAC2005, Santos, SP, Brasil, Agosto 28 – Setembro 2005

Microsoft Developer Studio, Fortran Power Station 4.0 – *The Microsoft IMSL Libraries* – Microsoft Corporation 1994

Ministério das Minas e Energia, 2005, disponível em: <http://www.mme.gov.br>, acessado em 08/2005

Nuclear Energy Plant Optimization, disponível em: www.nepo.ne.doe.gov , 2001

Oliveira, A. C. M., 2001, *Algoritmos Evolutivos para Problema de Otimização Numérica com Variáveis Reais*, Monografia para Exame de Qualificação do Curso de Computação Aplicada, INPE, São José dos Campos, SP, Brasil

Pacheco, M. A. C., *Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações*, Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada (ICA) – Departamento de Engenharia Elétrica - PUC, Rio de Janeiro, 1999, disponível <http://www.ica.ele.puc-rio.br>, acesso em 2003

PEPSE[®], version 62.1 2001, SCIENTECH Incorporation

Pereira, C. M. N. A., 2000, *GACLSLIB: Genetic Algorithm Class Library – Uma biblioteca de Classes para Desenvolvimento de Algoritmos Genéticos sob Paradigma de Orientação a Objetos*, em: Comunicação Técnica SUFIR-01/00IEN, Rio de Janeiro, Brasil

Rocha, J. G.; Alvim, A. C. M.; Martinez, A. S., 2002 – *Estudo da Otimização da Eficiência de Reator PWR em função das Extrações de Vapor da Turbina* - Encontro

Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica – VIII ENFIR - INAC 2002, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro

Sacco, W. F.; Pereira, C. M. N. A., Schirru, R., 2002 – *A Genetic Algorithm Applied to a PWR Extraction to Increase Cycle Efficiency* - Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica – VIII ENFIR - INAC 2002, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro

Relatório Anual de Operação de Angra 2 , Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2003

Sacco W. F. , Pereira C. M. N. A. , Soares P. P. M. and Schirru R. , 2002 - *Genetic Algorithms applied to turbine extraction optimization of a pressurized-water reactor* Applied Energy, 73, pp.217-222

Salisbury, J. K., 1950 - *Steam Turbines and Their Cycles* – John Wiley & Sons, Inc., New York

SAS, Institute Inc., *SAS/STAT User's Guide*, disponível em: www.id.unizh.ch, acessado em 2004

SimTech., *IPSEpro user documentation* – version 3.1. Austria, 2000

Spencer, R. C., McClintock, R. B., 1992, “*Properties of Steam and Water using the 1967 IFC Formulation for Industrial Use and other IAPWS releaser*”, American Society of Mechanical Engineers, Westinghouse Electric Corporation, USA

Tanomaru, J., 1995, *Motivação, Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos*, In: Anais do II Congresso Brasileiro de Redes Neurais, pp.331 – 411, Curitiba, Outubro 29 – Novembro 01

The Economics of Nuclear Power ,disponível em: www.uic.com.qu/nip08.htm, acessado em: 06/2002

APÊNDICE A

Neste Apêndice são listados os arquivos de comparação entre os valores de energia do diagrama fornecido comparados aos valores do diagrama, nos mesmos pontos, obtidos através do programa desenvolvido, para os quatro níveis de potência (25 %, 50 %, 75 % e 100%).

Verificando os resultados, constata-se que o programa apresenta consistência em seus resultados. Isto é um forte indício que a solução obtida é uma solução do problema.

*** Arquivo de Comparacao Calculo Diagrama ***

100 % de potência

	massa_calç	massa_orig	energia_calç	energia_orig
01	2055.6210000	2055.6210000	2776.2000000	2776.2000000
02	1933.4740000	1933.4740000	2775.8000000	2775.8000000
03	122.1470000	122.1470000	2775.8000000	2775.8000000
04L	2.6150000	2.6150000	942.1000000	942.1000000
04V	150.0690000	150.0690000	2627.3998894	2627.4000000
05	152.6840000	152.6840000	2598.5359665	2598.6000000
06	1779.0540000	1779.0540000	2532.1000335	2532.1000000
07	214.8953539	215.6220000	793.0818432	793.4000000
08	1461.2386461	1460.5120000	2771.0188480	2771.9000000
09	122.1470000	122.1470000	1207.8000000	1207.8000000
10	1461.2386461	1460.5120000	2902.0901802	2903.1000000
11	102.9200000	102.9200000	2771.0188480	2771.9000000
12	102.9200000	102.9200000	2771.0188480	2771.9000000
13	63.3840000	63.3840000	2778.7230934	2778.9000000
14	63.3840000	63.3840000	2778.7230934	2778.9000000
15	79.0220000	79.0220000	2656.0789676	2656.1000000
16	79.0220000	79.0220000	2656.0789676	2656.1000000
17L	13.4530000	13.4530000	411.0000000	411.0000000
17V	91.1920000	91.1920000	2513.8718806	2513.9000000
18	104.6450000	104.6450000	2243.5299110	2243.5000000
19	17.3650000	17.3650000	343.5000000	343.5000000
20L	22.8680000	22.8680000	264.7000000	264.7000000
20V	34.3210000	34.3210000	2395.0379519	2395.1000000
21	74.5540000	74.5540000	1263.7569366	1263.8000000
22	1140.5956461	1139.8690000	2328.8640046	2328.9000000
23	1320.5686461	1319.8420000	165.0665364	165.1000000
24	1320.5686461	1319.8420000	167.2653258	167.3000000

25	1320.5686461	1319.8420000	167.7752553	167.8000000
26	1320.5686461	1319.8420000	171.4750264	171.5000000
27	1320.5686461	1319.8420000	187.5216080	187.5000000
28	1320.5686461	1319.8420000	244.3953645	244.4000000
29	1320.5686461	1319.8420000	390.2805826	390.4000000
30	1320.5686461	1319.8420000	517.4990900	517.7000000
31	1399.5906461	1398.8640000	518.2093599	518.4000000
32	2055.6210000	2055.6210000	630.9123570	631.3000000
33	2055.6210000	2055.6210000	642.0123570	642.4000000
34	2055.6210000	2055.6210000	779.1716566	779.5000000
35	2055.6210000	2055.6210000	920.8522715	921.2000000
36	2055.6210000	2055.6210000	936.0343301	936.4000000
37	79.0220000	79.0220000	530.0789676	530.1000000
38	592.6463539	593.3730000	667.3611173	667.8000000
40	.3180000	.3180000	414.5000000	414.5000000
41	179.1990000	179.1990000	196.1995507	196.2000000
42	104.6450000	104.6450000	200.0299110	200.0000000
43	74.5540000	74.5540000	256.3569366	256.4000000
44	104.6450000	104.6450000	402.5299110	402.5000000
45	274.8310000	274.8310000	807.1644258	807.2000000
46	122.1470000	122.1470000	952.3000000	952.3000000
B1	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
B2	1.6840000	1.6840000	.0000000	.0000000
B3	1.2280000	1.2280000	.0000000	.0000000
B4	.4560000	.4560000	2532.1000000	2532.1000000
C1	.0520000	.0520000	.0000000	.0000000
C2	.2660000	.2660000	.0000000	.0000000
C3	.3180000	.3180000	2532.1000000	2532.1000000
D1	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
D2	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
E1	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
E2	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000

ponto com errmmax = Pt07

errmmax = .0033700

ponto com errhmax = Pt38

errhmax = .0006572

75 % de potência

	massa_calç	massa_orig	energia_calç	energia_orig
01	1506.1690000	1506.1690000	2768.5000000	2768.5000000
02	1386.3390000	1386.3390000	2767.9000000	2767.9000000
03	119.8300000	119.8300000	2767.9000000	2767.9000000
04L	2.5350000	2.5350000	868.5000000	868.5000000
04V	92.2520000	92.2520000	2622.2999449	2622.3000000
05	94.7870000	94.7870000	2575.3960144	2575.4000000
06	1290.2660000	1290.2660000	2530.9000944	2530.9000000
07	145.5451960	146.3540000	735.7438007	736.1000000
08	1072.9798040	1072.1710000	2759.1447230	2760.6000000
09	119.8300000	119.8300000	1249.0000000	1249.0000000

10	1072.9798040	1072.1710000	2928.7749307	2930.3000000
11	71.7410000	71.7410000	2759.1447230	2760.6000000
12	71.7410000	71.7410000	2759.1447230	2760.6000000
13	39.7820000	39.7820000	2800.7332007	2801.0000000
14	39.7820000	39.7820000	2800.7332007	2801.0000000
15	53.4930000	53.4930000	2677.0701857	2677.1000000
16	53.4930000	53.4930000	2677.0701857	2677.1000000
17L	5.3880000	5.3880000	378.2000000	378.2000000
17V	62.8450000	62.8450000	2534.3763973	2534.4000000
18	68.2330000	68.2330000	2364.1145236	2364.1000000
19	10.8460000	10.8460000	313.8000000	313.8000000
20L	14.9340000	14.9340000	239.4000000	239.4000000
20V	22.5200000	22.5200000	2400.9246649	2401.0000000
21	48.3000000	48.3000000	1263.9233510	1264.0000000
22	864.1358040	863.3270000	2335.3598745	2335.4000000
23	980.9908040	980.1820000	152.8228232	152.9000000
24	980.9908040	980.1820000	155.3207620	155.4000000
25	980.9908040	980.1820000	156.0068186	156.1000000
26	980.9908040	980.1820000	158.7936501	158.9000000
27	980.9908040	980.1820000	172.0995576	172.2000000
28	980.9908040	980.1820000	222.9602790	223.1000000
29	980.9908040	980.1820000	361.6741909	361.9000000
30	980.9908040	980.1820000	480.9685162	481.3000000
31	1034.4838040	1033.6750000	481.4029653	481.7000000
32	1506.1690000	1506.1690000	580.4300240	580.9000000
33	1506.1690000	1506.1690000	593.8300240	594.3000000
34	1506.1690000	1506.1690000	727.1344588	727.6000000
35	1506.1690000	1506.1690000	854.0729153	854.5000000
36	1506.1690000	1506.1690000	881.9823757	882.4000000
37	53.4930000	53.4930000	489.3701857	489.4000000
38	431.9031960	432.7120000	613.1081509	613.7000000
40	.3180000	.3180000	414.5000000	414.5000000
41	116.5330000	116.5330000	176.7767348	176.8000000
42	68.2330000	68.2330000	178.5145236	178.5000000
43	48.3000000	48.3000000	230.9233510	231.0000000
44	68.2330000	68.2330000	369.8145236	369.8000000
45	214.6170000	214.6170000	748.0982397	748.1000000
46	119.8300000	119.8300000	898.2000000	898.2000000
B1	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
B2	1.2340000	1.2340000	.0000000	.0000000
B3	1.2300000	1.2300000	.0000000	.0000000
B4	.0040000	.0040000	2530.9000000	2530.9000000
C1	.0520000	.0520000	.0000000	.0000000
C2	.2660000	.2660000	.0000000	.0000000
C3	.3180000	.3180000	2530.9000000	2530.9000000
D1	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
D2	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
E1	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
E2	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000

ponto com errmmax = Pt07

errmmax = .0055264

ponto com errhmax = Pt38

errhmax = .0009644

50 % de potência

	massa_calç	massa_orig	energia_calç	energia_orig
01	977.6770000	977.6770000	2759.9000000	2759.9000000
02	873.9940000	873.9940000	2758.9000000	2758.9000000
03	103.2650000	103.2650000	2758.9000000	2758.9000000
04L	2.1260000	2.1260000	776.0000000	776.0000000
04V	46.6450000	46.6450000	2616.8999735	2616.9000000
05	48.7710000	48.7710000	2536.6524218	2536.6000000
06	824.3810000	824.3810000	2530.8999430	2530.9000000
07	83.6839107	84.0400000	662.1007737	662.4000000
08	698.0430893	697.6870000	2742.0367559	2743.0000000
09	103.2650000	103.2650000	1285.2000000	1285.2000000
10	698.0430893	697.6870000	2960.0485561	2961.1000000
11	42.6540000	42.6540000	2742.0367559	2743.0000000
12	42.6540000	42.6540000	2742.0367559	2743.0000000
13	21.0130000	21.0130000	2827.2130367	2827.4000000
14	21.0130000	21.0130000	2827.2130367	2827.4000000
15	31.2750000	31.2750000	2699.4788230	2699.5000000
16	31.2750000	31.2750000	2699.4788230	2699.5000000
17L	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
17V	37.2870000	37.2870000	2556.9974662	2557.0000000
18	37.2870000	37.2870000	2556.9974662	2557.0000000
19	5.1120000	5.1120000	274.1000000	274.1000000
20L	8.3030000	8.3030000	205.5000000	205.5000000
20V	10.7680000	10.7680000	2405.2327813	2405.3000000
21	24.1830000	24.1830000	1199.4794810	1199.5000000
22	585.2330893	584.8770000	2350.8658898	2350.9000000
23	647.0150893	646.6590000	140.3491815	140.4000000
24	647.0150893	646.6590000	143.6473653	143.7000000
25	647.0150893	646.6590000	144.6996536	144.7000000
26	647.0150893	646.6590000	146.3426620	146.4000000
27	647.0150893	646.6590000	156.1050584	156.1000000
28	647.0150893	646.6590000	193.5672773	193.6000000
29	647.0150893	646.6590000	322.1266277	322.2000000
30	647.0150893	646.6590000	431.5479050	431.7000000
31	678.2900893	677.9340000	431.7429867	431.9000000
32	977.6770000	977.6770000	515.6817906	516.0000000
33	977.6770000	977.6770000	533.4817906	533.8000000
34	977.6770000	977.6770000	658.9188834	659.2000000
35	977.6770000	977.6770000	767.8671537	768.2000000
36	977.6770000	977.6770000	816.6860202	817.0000000
37	31.2750000	31.2750000	435.7788230	435.8000000
38	278.3739107	278.7300000	545.7228700	546.1000000
40	.3120000	.3120000	414.5000000	414.5000000
41	61.4700000	61.4700000	155.3903906	155.4000000
42	37.2870000	37.2870000	156.7974662	156.8000000
43	24.1830000	24.1830000	197.1794810	197.2000000
44	37.2870000	37.2870000	326.1974662	326.2000000
45	152.0360000	152.0360000	672.1168162	672.1000000
46	103.2650000	103.2650000	823.0000000	823.0000000
B1	.4180000	.4180000	.0000000	.0000000
B2	.7900000	.7900000	.0000000	.0000000
B3	1.2080000	1.2080000	.0000000	.0000000

B4	.000000	.000000	.000000	.000000
C1	.0520000	.0520000	.0000000	.0000000
C2	.2600000	.2600000	.0000000	.0000000
C3	.3120000	.3120000	2596.7000000	2596.7000000
D1	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
D2	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
E1	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
E2	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000

ponto com errmmax = Pt07

errmmax = .0042371

ponto com errhmax = Pt38

errhmax = .0006906

25 % de potência

	massa_calç	massa_orig	energia_calç	energia_orig
01	451.3590000	451.3590000	2756.3000000	2756.3000000
02	368.5970000	368.5970000	2754.3000000	2754.3000000
03	64.9320000	64.9320000	2754.3000000	2754.3000000
04L	.8560000	.8560000	635.5000000	635.5000000
04V	1.0150000	1.0150000	2623.1998639	2623.2000000
05	1.8710000	1.8710000	1713.8085846	1713.8000000
06	366.3340000	366.3340000	2548.1999469	2548.2000000
07	27.3517583	27.5800000	551.4109183	551.6000000
08	338.9822417	338.7540000	2709.3166197	2710.7000000
09	64.9320000	64.9320000	1299.1000000	1299.1000000
10	338.9822417	338.7540000	2988.0599719	2989.7000000
11	.0000000	.0000000	2709.3166197	2710.7000000
12	16.6860000	16.6860000	2754.3000000	2754.3000000
13	.0000000	.0000000	2856.3996167	2856.7000000
14	.3100000	.3100000	2764.3000000	2764.3000000
15	13.1720000	13.1720000	2721.9603465	2722.0000000
16	13.1720000	13.1720000	2721.9603465	2722.0000000
17L	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
17V	15.3980000	15.3980000	2580.2953330	2580.3000000
18	15.3980000	15.3980000	2580.2953330	2580.3000000
19	.0770000	.0770000	212.0000000	212.0000000
20L	2.7460000	2.7460000	158.2000000	158.2000000
20V	1.1610000	1.1610000	2418.6253536	2418.7000000
21	3.9840000	3.9840000	817.9631615	818.0000000
22	307.3482417	307.1200000	2408.4395869	2408.5000000
23	327.0362417	326.8080000	127.7861077	127.9000000
24	327.0362417	326.8080000	133.4821296	133.6000000
25	327.0362417	326.8080000	135.5923600	135.7000000
26	327.0362417	326.8080000	135.8839442	136.0000000
27	327.0362417	326.8080000	141.5810436	141.7000000
28	327.0362417	326.8080000	149.7211470	149.9000000
29	327.0362417	326.8080000	258.9689148	259.2000000
30	327.0362417	326.8080000	354.2841552	354.6000000
31	340.2082417	339.9800000	354.3296943	354.6000000
32	451.3590000	451.3590000	510.8581551	511.2000000
33	451.3590000	451.3590000	545.5581551	545.9000000

34	451.3590000	451.3590000	628.3751540	628.7000000
35	451.3590000	451.3590000	632.8997043	633.3000000
36	451.3590000	451.3590000	632.8997043	633.3000000
37	13.1720000	13.1720000	355.4603465	355.5000000
38	45.9087583	46.1370000	540.7345013	540.9000000
40	.3060000	.3060000	414.5000000	414.5000000
41	19.3820000	19.3820000	136.2887201	136.3000000
42	15.3980000	15.3980000	138.9953330	139.0000000
43	3.9840000	3.9840000	149.7631615	149.8000000
44	15.3980000	15.3980000	259.9953330	260.0000000
45	1.8710000	1.8710000	622.3085846	622.3000000
46	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
B1	.8340000	.8340000	.0000000	.0000000
B2	.3400000	.3400000	.0000000	.0000000
B3	1.1740000	1.1740000	.0000000	.0000000
B4	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
C1	.0520000	.0520000	.0000000	.0000000
C2	.2540000	.2540000	.0000000	.0000000
C3	.3060000	.3060000	2669.8000000	2669.8000000
D1	16.6860000	16.6860000	.0000000	.0000000
D2	16.6860000	16.6860000	2754.3000000	2754.3000000
E1	.3100000	.3100000	.0000000	.0000000
E2	.3100000	.3100000	2764.3000000	2764.3000000

ponto com errmmax = Pt07

errmmax = .0082756

ponto com errhmax = Pt28

errhmax = .0011931

APÊNDICE B

Neste apêndice são listados os coeficientes calculados, a partir da otimização empregando o método determinístico de *quasi-Newton*, que compõem os balanços de massa e energia.

Número total de componentes = 46

Índice M = coeficiente de massa

Índice H = coeficiente de energia

BBA01M	1	.0000000	
BBA01H	1	-2527.2321232	
BBA02M	1	.0000000	
BBA02H	1	-20759.1469384	
CON00M	2	1.0000000	.0000000
CON00H	2	.0000000	155.2931846
DIV01M	1	.0000000	
DIV01H	1	.5600000	
DIV02M	1	1534.5179440	
DIV02H	1	.0000000	
DRN01M	1	2.5510000	
DRN01H	1	883.2200000	
DRN05M	1	7.0010000	
DRN05H	1	384.7600000	
DRN06M	1	12.1498000	
DRN06H	1	319.7400000	
DRN07M	1	16.5208000	
DRN07H	1	244.4600000	
DSU00M	2	1.3715332	-.0004966
DSU00H	2	.0000000	748.2059651
DSVB1M	1	.0000000	
DSVB1H	1	.0000000	
DSVB2M	1	1.3240000	
DSVB2H	1	.0000000	
DSVB3M	1	1.2296000	
DSVB3H	1	.0000000	
DSVB4M	1	.0944000	
DSVB4H	1	2531.1400000	
DSVC1M	1	.0520000	
DSVC1H	1	.0000000	
DSVC2M	1	.2660000	
DSVC2H	1	.0000000	
DSVC3M	1	.3180000	
DSVC3H	1	2531.1400000	
DSVD1M	1	.0000000	
DSVD1H	1	.0000000	
DSVD2M	1	.0000000	
DSVD2H	1	.0000000	
DSVE1M	1	.0000000	
DSVE1H	1	.0000000	
DSVE2M	1	.0000000	
DSVE2H	1	.0000000	
EXT00M	2	.0000000	77.3083520
EXT00H	2	1.0000000	.0000000

EXT01M	2	.0000000	141.5457324
EXT01H	2	1.0000000	.0000000
EXT03M	2	.0000000	36.8866405
EXT03H	2	1.0000000	.0000000
EXT04M	2	.0000000	58.2125433
EXT04H	2	1.0000000	.0000000
EXT05M	2	.0000000	72.4515667
EXT05H	2	1.0000000	.0000000
EXT07M	2	.0000000	25.6317458
EXT07H	2	1.0000000	.0000000
FIX00M	1	1616.0594000	
FIX00H	1	2770.0400000	
TBE01M	2	1.0000000	.0000000
TBE01H	2	.3946594	1562.8888789
TBE02M	2	1.0000000	.0000000
TBE02H	2	.1793249	2014.7855067
TBE03M	2	1.0000000	.0000000
TBE03H	2	.1747745	2340.8026329
TBE04M	2	1.0000000	.0000000
TBE04H	2	.1131964	2355.3079893
TBE05M	2	1.0000000	.0000000
TBE05H	2	.0513278	2255.9595110
TBE06M	2	1.0000000	.0000000
TBE06H	2	.0733368	2328.8030614
TBE07M	2	1.0000000	.0000000
TBE07H	2	.0735636	2118.8747341
TBE08M	2	1.0000000	.0000000
TBE08H	2	.5510526	1042.5596745
TCA01M	1	.0000000	
TCA01H	1	672.2179008	
TCA02M	1	.0000000	
TCA02H	1	3132.8570640	
TCA03M	1	.0000000	
TCA03H	1	14596.6448056	
TCA04M	1	.0000000	
TCA04H	1	55116.4501680	
TCA05M	1	.0000000	
TCA05H	1	147154.3586576	
TCA06M	1	.0000000	
TCA06H	1	126901.3745936	
TCA07M	1	.0000000	
TCA07H	1	216446.0761936	
TCA08M	1	.0000000	
TCA08H	1	208845.2119960	
TCA09M	1	.0000000	
TCA09H	1	38736.4349240	
TCA10M	1	.0000000	
TCA10H	1	185296.3492368	

