

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE EXERGOCONÔMICA DOS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÃO  
ENRIQUECIDA COM OXIGÊNIO EM TURBINAS A GÁS**

por

CASSIANO LUIZ JOB

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2011.

**ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA DOS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÃO  
ENRIQUECIDA COM OXIGÊNIO EM TURBINAS A GÁS**

por

CASSIANO LUIZ JOB

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi  
UFRGS / DEMEC

Profa. Dra. Adriane Prisco Petry  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey  
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre, julho de 2011.

"Vá confiantemente na direção de seus sonhos. Viva a vida que você imaginou."  
*Henry David Thoreau*

"Aquele que quer aprender a voar um dia precisa primeiro aprender a ficar de pé, caminhar, correr, escalar e dançar; ninguém consegue voar só aprendendo voo."  
*Friedrich Nietzsche*

"Escrever é fácil. Você começa com uma maiúscula e termina com um ponto final.  
No meio, coloca ideias."  
*Pablo Neruda*

"Faça, ou não faça. Não existe apenas tentar."  
*Mestre Yoda*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a *Deus*, que sempre escreve certo, mesmo quando teimamos em entortar a linha do nosso caminho.

aos meus pais, *Luiz Carlos (in memorian)* e *Cassiana*, e à minha irmã, *Clarisse*, família amada, a qual tive a sorte e a alegria de pertencer.

à minha namorada, *Cristina*, que mesmo à distância sempre acreditou nesse sonho.

aos professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que com sua competência e dedicação ajudaram a sedimentar o conhecimento adquirido ao longo do curso e, em especial, ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Smith Schneider*, pelo auxílio, orientação e amizade demonstrada.

ao doutorando *Cristiano Frandalozo Maidana*, pela sua generosidade em compartilhar o conhecimento, paciência, amizade e disponibilidade constante no desenvolvimento do presente trabalho.

aos colegas e grandes amigos, *Daniela Ramminger Pissanti*, *Diogo Bettoni*, *Maurício Rockenbach*, *Marcelo Schramm*, que estiveram ao meu lado desde o início de toda jornada, e ao mestre *Tiago Filipi Longhi* que eu tenho o grande orgulho de chamar de amigo.

JOB, C. L. **Análise exergoeconômica dos efeitos da utilização de combustão enriquecida com oxigênio em turbinas a gás**. 2011. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## **RESUMO**

O presente trabalho apresenta uma análise exergoeconômica de uma turbina a gás operando com combustão enriquecida com oxigênio (*Oxygen-Enhanced Combustion – OEC*) na proporção de até 30% do oxidante. Equações de balanço de massa, de energia e de verificação de exergia são utilizadas para modelar o equipamento e analisar a disponibilidade de recursos frente às perdas inerentes a todo sistema térmico. Os valores dos custos ligados à aquisição de equipamentos, manutenção, operação e outros advindos do abastecimento de metano e oxigênio são estimados por meio de relações de ajustes e em alguns casos com valores reais de mercado. É constatado que o processo de enriquecimento da corrente de oxidante proporciona uma redução de 16% da exergia destruída na câmara de combustão e aumento da exergia disponível na turbina, mesmo que à custa do aumento dos custos de aquisição de equipamentos como a turbina (1,7%) e a câmara de combustão (19%) e no abastecimento de oxigênio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Turbina a gás, combustão enriquecida com oxigênio, exergia, Exergoeconomia.

JOB, C. L. **Exergoeconomic analysis of a gas turbine under oxygen enhanced combustion**. 2011. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## **ABSTRACT**

The present work is an exergoeconomic analysis of a gas turbine operating under oxygen enhanced combustion (*OEC*) conditions with oxidant proportions up to 30%. The analysis of the availability of the resources in the face of losses, which are intrinsic of all thermal system, is carried out through mass and energy equations, as well as exergy verification. The figures from expenses with equipment acquisition, maintenance, operations, methane and oxygen supplies are estimated based on adjustments and, in some cases, on real market numbers. Simulation show that the oxygen enhancement process provides a 16% decrease of the destroyed exergy in the combustion chamber and an increase of available exergy in the turbine, although those figures also represent an increase of expenses related to equipment acquisition, such as the turbine itself (1,7%), the combustion chamber (19%) and oxygen supply.

**KEYWORDS:** Gas turbine, oxygen enhanced combustion, exergy, exergoeconomics.

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
3.1	Combustão Enriquecida com Oxigênio.....	2
3.2	Conceito de Exergia.....	2
3.3	Análise Exergoeconômica.....	3
3.4	Metodologia para Avaliação do Sistema Térmico.....	6
4.	MODELO PROPOSTO .....	7
4.1	Hipóteses de Simplificação do Sistema.....	7
5.	METODOLOGIA.....	8
5.1	Modelamento das Equações Envolvendo o Sistema de Combustão.....	8
5.2	Modelamento dos custos com investimento, abastecimento de combustível e oxigênio, manutenção e operação.....	9
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
7	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
	Apêndice A.....	16
	Apêndice B.....	17
	Anexo A.....	18
	Anexo B.....	19
	Anexo C.....	20

## 1. INTRODUÇÃO

O governo brasileiro prevê um crescimento da população brasileira em mais de 55 milhões de pessoas até 2030, o que requer o aumento e a diversificação da matriz energética nacional. Investimentos em exploração e produção de gás natural têm sido realizados buscando complementar a quantidade importada de países vizinhos, como a Bolívia. O setor industrial se apresenta como o principal consumidor desse tipo de combustível. Além disso, o Plano Nacional de Energia - PNE prevê um crescimento de 9% de consumo de gás natural que era consumido 2005 até 15% em 2030. Nesse cenário que se apresenta, a utilização de maneira eficiente desta fonte energética tem se mostrado um problema de grande relevância.

Entretanto, apesar de sua grande relevância e aceitação, a quantidade de poluentes liberados durante o processo de combustão causa inquietação em engenheiros, pesquisadores e ambientalistas.

Uma alternativa para esse problema é o processo de combustão enriquecida com oxigênio. Segundo Baukal, 1998, é possível, dependendo do processo industrial ao qual é aplicado, provocar uma diminuição da quantidade de combustível consumido, reduzir o volume de gases inertes que são aquecidos bem como diminuir a quantidade de poluentes emitidos durante o processo de combustão.

No entanto, apesar de se mostrar eficiente em seus objetivos, o processo de enriquecimento de oxigênio tem um custo elevado, o que dificulta a sua utilização. Dessa forma, justifica-se a avaliação econômica da viabilidade de implantação e direcionamento de esforços para aumentar a eficiência do processo.

O trabalho desenvolvido tem sua origem no estudo de Combustão Enriquecida com Oxigênio desenvolvido por Maidana *et al*, 2010, aplicado a uma turbina a gás estacionária de eixo único. A este ciclo, Boeira *et al*, 2011, acrescentaram regeneradores e resfriador intermediário entre estágios de compressão (*intercooler*) obtendo um aumento de 13% acima da eficiência do ciclo original.

O objetivo do presente trabalho é realizar uma análise sob o ponto de vista da variação de exergia e realizar uma avaliação econômica do modelo de turbina a gás de maior eficiência.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Poola *et al*, 1996, realizaram estudos de combustão enriquecida com oxigênio em motores de combustão interna de locomotivas. Foi verificada a redução de emissão de partículas e fumos visíveis, além de aumento da eficiência térmica da ordem de 13% para motores simplesmente aspirados e 4% para motores turbo-alimentados.

Horbaniuc *et al*, 2004, estudaram os efeitos do aumento da concentração de oxigênio na combustão de gás natural. Obtiveram em seus experimentos um aumento na temperatura dos gases de combustão, além da redução da transferência de calor para o meio quando a concentração de oxigênio estava presente em valores acima de 50% de volume do comburente. A redução da transferência de calor é atribuída ao menor volume de gases expelidos, o que viria a diminuir a convecção.

Wu *et al*, 2010, fizeram um estudo experimental de combustão enriquecida com até 30% de oxigênio em câmaras de combustão de gás natural, onde obtiveram uma redução no tempo de aquecimento em até 46% e redução da emissão de CO em 50%. Relatam ainda a redução do consumo de combustível em até 26,1%. Em contrapartida, constataram o aumento das emissões de NO<sub>x</sub> e de CO<sub>2</sub>.

Maidana *et al*, 2010, efetuaram a simulação de um ciclo simples de uma turbina a gás com enriquecimento de 30% de oxigênio, em processo de combustão estequiométrico. Como resultados, obtiveram o aumento da temperatura de chama adiabática e a redução de 8,25% no consumo de combustível e uma redução de 33,2% de liberação de gases de exaustão.

Os casos acima relatam o aumento da eficiência do ciclo e/ou a redução do consumo de combustível, representando um melhor aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis a partir do enriquecimento do oxidante com oxigênio.



### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Combustão Enriquecida com Oxigênio

A combustão enriquecida por oxigênio (em inglês *OEC – Oxygen Enhanced Combustion*) consiste no processo controlado que provoca o aumento da concentração de  $O_2$  na corrente oxidante convencional (ar atmosférico), resultando na elevação na inflamabilidade da mistura reatante e o aumento da temperatura de chama adiabática. Desta reação, ocorre uma expansão das taxas de transferência de calor, que provoca uma maior eficiência no processo de produção [BAUKAL, 1998]. Quando a razão de equivalência é mantida constante, na prática verifica-se a redução da fração de  $N_2$  presente no oxidante, para a mesma quantidade de  $O_2$  requerida para o processo de combustão.

Segundo o referido autor, os regimes de operação enriquecidos com o  $O_2$  ocupando até 30% do volume do comburente são classificados como baixo nível de enriquecimento. A adaptação de um ciclo de turbina a gás sem enriquecimento de oxigênio para este modelo não requer custos elevados. Além disso, o alto custo de produção de oxigênio puro recomenda esta classe de enriquecimento para os casos em que não exige altas temperaturas de combustão, caso em que se recomendaria um percentual maior do nível de enriquecimento. O presente trabalho estudará apenas as turbinas classificadas como baixo nível de enriquecimento.

#### 3.2 Conceito de Exergia

Exergia é o máximo trabalho reversível que pode ser obtido quando dois sistemas em estados diferentes são colocados em contato até atingir o equilíbrio termodinâmico. A exergia é a parte da energia que pode ser transformada em trabalho, descontando-se as irreversibilidades inerentes ao processo e a energia perdida para o ambiente [MORAN e SHAPIRO, 2002]. No presente trabalho, os equipamentos serão modelados como adiabáticos, permitindo desconsiderar a parcela de energia perdida para o ambiente. Nesse caso, o balanço de energia se torna:

$$\dot{W}_{real} = \dot{W}_{rev} - \dot{I} \quad (3.1)$$

onde  $\dot{W}_{real}$  é a potência real realizada [kW],  $\dot{W}_{rev}$  é a potência máxima reversível [kW] e  $\dot{I}$  é a irreversibilidade associada à mudança de estado [kW].

Uma oportunidade de realizar trabalho existe quando um sistema fechado possui estado termodinâmico diverso do ambiente. Entretanto, conforme um estado de um sistema se modifica ao ponto de ir se aproximando das condições ambientais, essa oportunidade decresce e cessa a sua existência quando atinge equilíbrio com o ambiente. Uma vez atingido este equilíbrio, não será possível realizar qualquer trabalho a partir desta energia existente no ambiente. Esse estado do sistema em que não é mais possível haver uma variação espontânea do sistema é chamado de **estado morto** [MORAN E SHAPIRO, 2002].

Para o presente trabalho, a condição de estado morto será tomada como as condições ambientais de pressão (1,03 bar) e temperatura (298,15 K). Salieta-se que a energia em um processo é sempre conservada, porém é possível perder a oportunidade de convertê-la em trabalho [VAN WYLEN *et al*, 2009].

A exergia total é um somatório da parcela física, química potencial e cinética. Devido às suas maiores relevâncias, serão apenas consideradas as duas primeiras parcelas.

A taxa de exergia física  $E_{x,Ph}$  [kW] de uma corrente ou sistema é a máxima potência obtida quando uma matéria é levada de seu estado inicial ( $P, T$ ) até atingir o equilíbrio com o estado morto ( $P_o, T_o$ ).

$$E_{x,Ph} = \dot{n}[(h - h_o) - T_o(s - s_o)] \quad (3.2)$$

onde  $\dot{n}$  é a vazão molar [kmol/s],  $h$  sua entalpia [kJ/kmol] e  $s$  a sua entropia [kJ/(kmol K)]. O subíndice  $o$  refere-se ao estado de referência.

A taxa de exergia química,  $E_{x\_Ch}$  [kW], é a máxima potência obtida por uma substância pela transformação de sua condição inicial até atingir o equilíbrio químico com o meio de referência.

$$E_{x\_Ch} = \dot{n} \left[ \sum x_i \bar{e}_i^{CH} + RT_o \sum x_i \ln x_i \right] \quad (3.3)$$

onde  $x_i$  é a fração do gás  $i$  na mistura de gases [kmol/kmol];  $\bar{e}_i^{CH}$  a exergia química padrão molar [kJ/kmol], e  $R$  a constante universal dos gases [ 8,314 kJ/(kmol K)].

A exergia química padrão molar para algumas substâncias se encontra em dois modelos na Tabela 1 do anexo A. Os valores possuem diferenças entre si devido à forma como foram calculados. Os valores adotados no presente trabalho são os contidos no modelo I, uma vez que este modelo é calculado considerando que o ambiente se encontra em equilíbrio, hipótese adotada no desenvolvimento do presente trabalho.

A exergia total ( $E_x$ ) é a soma destes dois tipos de exergias.

$$E_x = E_{x\_Ph} + E_{x\_Ch} \quad (3.4)$$

### 3.3 Análise exergoeconômica

A análise exergoeconômica é uma metodologia de análise econômica de um sistema térmico, baseada na avaliação de sua exergia. A partir da segunda Lei da Termodinâmica, busca avaliar as perdas econômicas a partir das irreversibilidades do sistema. (BEJAN *et al*, 1996).

Seguindo esta metodologia, deve-se primeiramente estimar os custos envolvidos na instalação da planta do sistema, englobando os custos de compra e instalação de equipamentos, custos de combustível, custos de operação e manutenção e valores envolvendo outros fatores econômicos, como inflação, tributos fiscais e outras despesas financeiras. O equacionamento adotado segue a seguinte sequência:

Inicia-se com o Investimento Total,  $IT$ :

$$IT = CDI \sum CCE_K \quad (3.5)$$

onde  $CDI$  são os custos diretos e indiretos incidentes [adimensional];  $CCE_K$  representa os Custos de Compra de Equipamentos [\$].

Calcula-se o custo anual do investimento  $A_{IT}$ [\$]:

$$A_{IT} = (FCP)(IT) \frac{ic_{prop}(1 + ic_{prop})}{(1 + ic_{prop})^{VU} - 1} + (FCT)(IT) \frac{ic_{terc}(1 + ic_{terc})}{(1 + ic_{terc})^{VU} - 1} + (IT) \frac{ic_a(1 + ic_a)}{(1 + ic_a)^{VU} - 1} \quad (3.6)$$

onde  $FCP$  é a fração de capital próprio [adimensional];  $ic_{prop}$  é a remuneração anual sobre o capital próprio [adimensional];  $VU$  é a vida útil esperada [anos];  $FCT$  é a fração de capital de terceiros [adimensional];  $ic_{terc}$  é a taxa de juros anual sobre capital de terceiros [adimensional];  $ic_a$  é a inflação anual projetada [adimensional].

O custo do combustível  $Cust_{comb}$  [\$/ano] é calculado pela equação (3.7).

$$Cust_{comb} = \dot{m}_{combustível} c_{comb} TOA \left( 3600 \left[ \frac{segundos}{hora} \right] \right) \quad (3.7)$$

onde  $\dot{m}_{combustível}$  é a vazão mássica de combustível [kg/s];  $c_{comb}$  é o valor econômico do combustível [\$/kg];  $TOA$  é o tempo de operação anual dos sistemas [hora/ano].

Esse valor deve ser corrigido ano a ano para englobar o tempo de vida útil da planta.

$$C_{comb\_total} = \sum_{m=1}^{VU} cust_{comb} (1 + ia_{comb})^m \quad (3.8)$$

onde  $C_{comb\_total}$  equivale ao custo de combustível corrigido ano a ano [\$];  $ia_{comb}$  é o aumento anual esperado no preço do combustível [adimensional];  $m$  equivale a cada um dos anos de vida útil da planta;  $VU$  é a vida útil estimada para a planta [anos].

Para cada valor de  $C_{comb\_total}$  calculado, deve ser calculado um valor de  $P_{comb\_total}$  [\$], que representa o capital principal, considerando as taxas de recuperação sobre capital próprio e de terceiros.

$$P_{comb\_total} = \frac{C_{comb\_total} FCP}{(1 - ic_{prop})^m} + \frac{C_{comb\_total} FCT}{(1 - ic_{terc})^m} \quad (3.9)$$

Após é calculado o custo anualizado  $A_{combustível}$  [\$], corrigido pelo valor da inflação.

$$A_{combustível} = \sum_{m=1}^{VU} P_{comb\_total} \frac{ia(1 + ia)^{VU}}{(1 + ia)^{VU} - 1} \quad (3.10)$$

A mesma metodologia deve ser aplicada para calcular os custos com  $O_2$ .

O cálculo do custo de Operação e Manutenção  $custo_{O\&M}$  é realizado de forma similar ao custo do combustível. Assim, o índice estimado para o gasto com manutenção e operação deve ser aplicado sobre o Investimento Total  $IT$ . Posteriormente, sobre este valor devem ser aplicadas as atualizações.

$$custo_{O\&M} = C_{O\&M} IT \quad (3.11)$$

onde  $custo_{O\&M}$  é o custo com operação e manutenção [\$];  $C_{O\&M}$  é o custo anual de operação e manutenção.

$$C_{O\&M\_m} = custo_{O\&M} (1 + ia_{comb})^m \quad (3.12)$$

onde  $C_{O\&M\_m}$  é o custo de operação e manutenção corrigido [\$].

$$P_{O\&M} = \frac{C_{O\&M} FCP}{(1 - ic_{prop})^m} + \frac{C_{O\&M} FCT}{(1 - ic_{terc})^m} \quad (3.13)$$

onde  $P_{O\&M}$  representa a soma das taxas de recuperação de capital sobre capital próprio e capital de terceiros [\$].

$$A_{O\&M} = \sum_{m=1}^{VU} P_{O\&M} \frac{ia(1+ia)^{VU}}{(1+ia)^{VU} - 1} \quad (3.14)$$

onde  $A_{O\&M}$  é o valor uniforme anualizado sobre operação e manutenção [\\$].

A atribuição do custo econômico a cada corrente de escoamento ou fluxo é feita através da taxa de custo exergetico,  $\dot{C}$  [\$/h].

$$\dot{C} = cE_x \quad (3.15)$$

onde  $c$  é o custo exergetico [\$/kJ] e  $E_x$  é a exergetia associada [kW].

A taxa de custo exergetico também pode estar associada à potência realizada.

$$\dot{C}_W = c\dot{W} \quad (3.16)$$

As taxas de custos relativas ao investimento em equipamento bem como manutenção e operação,  $Z_k$  [\$/h], onde  $k$  representa o  $k$ -ésimo equipamento da planta, são determinadas através de uma relação entre os custos corrigidos, o tempo de operação da planta durante o ano e o custo de aquisição para cada equipamento.

$$Z_k = \frac{A_{IT} + A_{O\&M}}{TOA \sum CCE_K} CCE_K \quad (3.17)$$

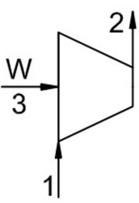
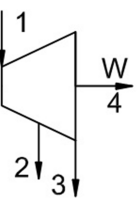
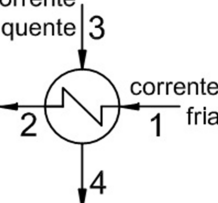
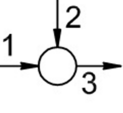
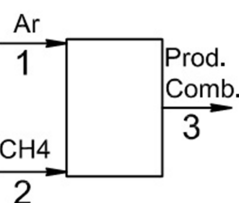
Considerando um volume de controle para cada equipamento, os custos associados a cada eixo ou corrente podem ser calculados pelas equações (3.15) a (3.17).

O próximo passo será montar um sistema de equações que represente a planta da turbina a gás. O sistema deverá seguir a metodologia da equação 3.18 juntamente com as informações dispostas na Tabela 3.1.

É determinado como *combustível* o fluxo que entra no equipamento e como *produto* a corrente que deixa o equipamento.

$$\dot{C}_{combustível\ k} + Z_k = \dot{C}_{produto\ k} \quad (3.18)$$

Tabela 3.1 Taxa de Custo Exergetico de Combustível e Produto (adaptada de Bejan *et al*, 1996)

Componente	Compressor	Turbina	Trocador de Calor	Misturador	Câmara de Combustão
Figura esquemática					
$\dot{C}_{Produto}$	$\dot{C}_1 - \dot{C}_2$	$\dot{C}_W$	$\dot{C}_2 - \dot{C}_1$	$\dot{C}_3$	$\dot{C}_3$
$\dot{C}_{Combustível}$	$\dot{C}_W$	$\dot{C}_1 - \dot{C}_2 - \dot{C}_3$	$\dot{C}_3 - \dot{C}_4$	$\dot{C}_1 + \dot{C}_2$	$\dot{C}_1 + \dot{C}_2$
Equação auxiliar	Não tem	$C_1 = C_2 = C_3$	$C_4 = C_3$	Não tem	Não tem

As equações auxiliares são formuladas igualando-se os custos exergeticos de combustível e produto conforme o modelo apresentado a seguir (3.19). Estas equações são

utilizadas para viabilizar a solução de um sistema composto pelo mesmo número de equações e de incógnitas.

$$c_1 = c_2 = \frac{\dot{C}_1}{E_1} = \frac{\dot{C}_2}{E_2} \quad (3.19)$$

As taxas de custos referentes aos abastecimentos de combustível e de  $O_2$  são calculadas tomando-se como base o custo anualizado de combustível e oxigênio,  $A_{combustível}$  e  $A_{O_2}$  respectivamente, e o tempo de operação anual.

$$\dot{C}_{combustível} = \frac{A_{combustível}}{TOA} \quad \dot{C}_{O_2} = \frac{A_{O_2}}{TOA} \quad (3.20)$$

No modelo proposto,  $\dot{C}_{combustível}$  corresponde à taxa de custo da corrente de injeção do combustível, enquanto que  $\dot{C}_{O_2}$  corresponde à taxa de custo da corrente de injeção do  $O_2$ .

### 3.4 Metodologia para Avaliação de Desempenho do sistema térmico

É importante observar a variação de exergia ao longo do percurso. Havendo redução de exergia entre a entrada e a saída de corrente ao passar por um nó ou equipamento, sabe-se que esta redução foi acarretada por perda de exergia para o ambiente ou destruição da mesma. Neste trabalho, as perdas para o ambiente são consideradas nulas, de forma que a diferença entre exergia do combustível para a exergia do produto será a exergia destruída.

$$E_{X_{Dk}} = E_{X_{Ck}} - E_{X_{Pk}} \quad (3.21)$$

onde  $E_{X_{Dk}}$  é a exergia destruída por equipamento [kW],  $E_{X_{Ck}}$  é a exergia entregue a este equipamento [kW] e  $E_{X_{Pk}}$  a quantidade de exergia devolvida à corrente [kW]. Onde  $k$  representa o  $k$ -ésimo equipamento da planta.

O custo exergético de combustível  $c_{combustível}$  [\$/kJ] é o valor econômico que deve ser fornecido ao equipamento para que este realize sua função. Por sua vez, o custo exergético do produto,  $c_{produto}$  [\$/kJ], representa o valor econômico entregue pelo equipamento à corrente que fará uso desta exergia.

Estes custos são determinados a partir da taxa de custo exergético [\$/h], definidos na Tabela 3.1, pela exergia da corrente.

$$c_{combustível} = \frac{\dot{C}_{combustível}}{E_{X_{combustível}}} \quad c_{produto} = \frac{\dot{C}_{produto}}{E_{X_{produto}}} \quad (3.22)$$

A taxa de custo de exergia destruída,  $\dot{C}_d$  [\$/h], é definida a partir do custo exergético de combustível,  $c_{combustível}$ , e pela exergia destruída por equipamento,  $E_{X_{Dk}}$ . Esta variável define a taxa de custo de exergia desperdiçada por equipamento em operação.

$$\dot{C}_d = c_{combustível} E_{X_{Dk}} \quad (3.23)$$

A diferença relativa de custo,  $r$  [adimensional], é calculada a partir da diferença relativa entre os custos de produto,  $c_{produto}$ , e os custos de combustível,  $c_{combustível}$ . A partir desta grandeza, pode ser estimado o aumento do custo do produto em relação ao custo do combustível.

$$r = \frac{C_{\text{produto}} - C_{\text{combustível}}}{C_{\text{combustível}}} \quad (3.24)$$

O fator exergoeconômico  $f$  [adimensional] relaciona os gastos com investimento, operação e manutenção do equipamento,  $Z_k$ , com a quantidade de exergia destruída,  $\dot{C}_d$ . Se o fator exergoeconômico atingir valores altos, os maiores gastos são empregados na aquisição, manutenção e operação do equipamento. Por outro lado, se atingir valores baixos, o principal motivo de custo do equipamento será com a quantidade de exergia destruída.

$$f = \frac{Z_k}{Z_k + \dot{C}_d} \quad (3.25)$$

#### 4. MODELO PROPOSTO

O sistema térmico simulado consiste na turbina a gás apresentada na Figura 4.1, composto por equipamentos convencionais como compressores, câmara de combustão e a turbina propriamente dita. A eles são acrescentados o estágio duplo de compressão com resfriador intermediário, e um regenerador de ar, que aumentam a eficiência do conjunto.

O sistema de combustão é formado por um separador, que tem a finalidade de desviar parte do ar atmosférico comprimido e lava-lo até o misturador, para resfriar os gases expelidos da câmara de combustão (ponto 11) antes de sua admissão na turbina (ponto 12). Isso se deve às limitações térmicas dos materiais, (COHEN, 1996). No ponto 8, está o injetor de oxigênio, onde  $O_2$  puro é misturado à corrente oxidante, respeitando a razão de equivalência adotada para o processo. O combustível (metano) é injetado diretamente na câmara de combustão no ponto 10.

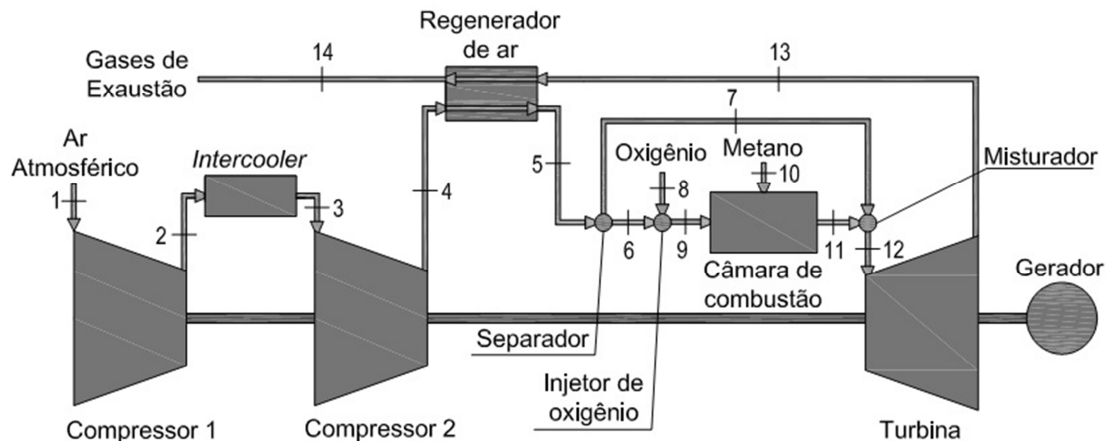


Figura 4.1: Representação do ciclo de combustão enriquecida com oxigênio baseado no ciclo desenvolvido por Maidana *et al* (1996).

O modelamento do problema é baseado na simulação numérica das relações termodinâmicas envolvidas no ciclo de operação de uma turbina a gás, desenvolvido por Maidana *et al* (2011). A partir deste modelo, foi desenvolvida a avaliação exergoeconômica do presente trabalho.

Para analisar o processo de OEC serão realizadas simulações com variações na fração de  $O_2$  nas proporções de 21, 24, 27 e 30% de volume de oxidante.

##### 4.1 Hipóteses de simplificação do sistema

1) Processo em regime permanente; 2) Todos os gases possuem comportamento de gás ideal; 3) O modelo de Dalton é adotado para comportamento dos fluidos; 4) Não serão

consideradas as perdas de carga nas tubulações e nos componentes; 5) Equipamentos são adiabáticos; 6) Os processos de compressão, e expansão dos gases são considerados isoentrópicos; 7) O ar atmosférico padrão é considerado formado por 79% de N<sub>2</sub> e 21% de O<sub>2</sub>; 8) Os únicos gases de combustão expelidos são CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>(g)</sub> e N<sub>2</sub>; 9) O O<sub>2</sub> injetado é considerado uma substância pura; 10) O combustível é formado por CH<sub>4</sub> puro; 11) Todo combustível injetado é queimado no processo de combustão (razão unitária de mistura ar/combustível); 12) As eficiências do compressor e da turbina não variam em função da carga dos equipamentos; 13) Não serão levadas em consideração as velocidades dos fluidos, desprezando-se, portanto, as propriedades de estagnação.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1 Modelamento das equações envolvendo o sistema de combustão

O equacionamento do problema envolve balanços de massa, espécies e energia ao longo do ciclo, seguindo o modelamento de Maidana *et al* (2010) e de Boeira (2010).

A seguir, apenas o equacionamento relativo ao sistema de combustão é detalhado, devido à sua importância no problema. Seguindo a Figura 4.1, após o ponto 6, uma parte da vazão do ar atmosférico comprimido é desviada do caminho normal até a câmara de combustão para ser encaminhada até o misturador e resfriar os gases produto da combustão. O balanço de massa entre os pontos 5, 6 e 7 define a fração  $y$  da vazão molar  $\dot{n}$  [kmol/s].

$$y\dot{n}_5 = \dot{n}_6 \quad (5.1)$$

$$(1-y)\dot{n}_5 = \dot{n}_7 \quad (5.2)$$

Aplicando-se o balanço de energia, no separador, tem-se:

$$\bar{h}_5 = \bar{h}_6 = \bar{h}_7 \quad (5.3)$$

onde  $\bar{h}$  é a entalpia específica molar [kJ/kmol].

O O<sub>2</sub> soma-se à corrente de oxidante no injetor (ponto 8) e os balanços de massa e energia são dados por

$$\dot{n}_6 + \dot{n}_8 - \dot{n}_9 = 0 \quad (5.4)$$

$$\dot{n}_6\bar{h}_6 + \dot{n}_8\bar{h}_8 - \dot{n}_9\bar{h}_9 = 0 \quad (5.5)$$

Na câmara de combustão, o CH<sub>4</sub> é injetado no ponto 10 e o balanço de queima para o modelo simulado fica:

$$\dot{n}_{CH_4,10} + \dot{n}_{O_2,9} + \dot{n}_{N_2,9} \rightarrow \dot{n}_{CO_2,11} + \dot{n}_{H_2O,11} + \dot{n}_{N_2,11} \quad (5.6)$$

O balanço de massa da reação de combustão se dá através destas equações:

$$\dot{n}_{CH_4,10} = \dot{n}_{CO_2,11} \quad (5.7)$$

$$4\dot{n}_{CH_4,10} = 2\dot{n}_{H_2O,11} \quad (5.8)$$

$$2\dot{n}_{O_2,9} = 2\dot{n}_{CO_2,11} + \dot{n}_{H_2O,11} \quad (5.9)$$

$$2\dot{n}_{N_2,9} = 2\dot{n}_{N_2,11} \quad (5.10)$$

Através da eq. 5.11, é realizado o balanço de energia na câmara de combustão:

$$\dot{n}_9 \bar{h}_9 + \dot{n}_{10} \bar{h}_{10} - \dot{n}_{11} \bar{h}_{11} = 0 \quad (5.11)$$

O misturador representa o ponto de onde os gases de combustão se misturam com a parcela de ar desviada no separador. Os balanços de massa e energia que representam esse ponto se encontram nas equações (5.12) e (5.13), respectivamente.

$$\dot{n}_{11} + \dot{n}_7 = \dot{n}_{12} \quad (5.12)$$

$$\dot{n}_{11} \bar{h}_{11} + \dot{n}_7 \bar{h}_7 - \dot{n}_{12} \bar{h}_{12} = 0 \quad (5.13)$$

## 5.2 Modelamento dos custos com investimento, abastecimento de combustível e oxigênio, manutenção e operação

Para o desenvolvimento deste trabalho, o custo de compra de cada equipamento,  $CCE_k$ , é estimado seguindo equações de ajuste compiladas por Bejan *et al*, (1996). Esta metodologia se encontra no Anexo B. O método fornece uma estimativa de custo de equipamentos em dólares americanos do ano de 1994. Como o presente trabalho se trata de uma verificação conceitual de um sistema de *OEC*, não será realizada uma conversão de moeda e nem uma atualização monetária. Os valores obtidos serão admitidos como sendo um valor monetário \$ indeterminado.

O mesmo autor também apresenta uma estimativa dos custos de instalação do sistema. Os valores da Tabela 2 do Apêndice A estão aproximados com os valores propostos, uma vez que não é objetivo deste trabalho a determinação exata dos custos.

Na posse destes valores, é possível estimar o valor do Investimento Total,  $IT$ , aplicando-se à Equação (3.5).

Também devem ser levados em consideração demais fatores econômicos que incidirão sobre os valores do investimento. Estes fatores estão previstos na Tabela 3 do Apêndice A. Estes valores não estão baseados em valores reais, sendo apenas estimados para a aplicação da metodologia de avaliação exergoeconômica.

Assim, toda a sequência apresentada na seção 3 do presente trabalho, composta pelas equações (3.4) até (3.14) é aplicada com os dados das tabelas anteriores. Ao seu final, é calculado o fator exergoeconômico  $f$  [adimensional], que relaciona os gastos com investimento, operação e manutenção do equipamento  $Z_k$  com a quantidade de exergia destruída,  $\dot{C}_d$ .

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O problema proposto foi modelado utilizando-se o software EES ([www.fchart.com](http://www.fchart.com)), que possui uma biblioteca de propriedades termodinâmicas das substâncias utilizadas na turbina a gás modelada. A solução dos sistemas de equações é baseada no método de Newton-Raphson.

Os parâmetros empregados na simulação referentes ao funcionamento de cada componente estão presentes na Tabela 1 do Apêndice A.

Nas tabelas abaixo, são apresentados os valores encontrados para Custo de Compra de Equipamento, Custo de Investimento, Operação e Manutenção de Equipamentos e de



Exergia Total, Taxa de Custo Exergético, de Custo Exergético, Exergia Destruída e de Diferença Relativa de Custo.

Tabela 6.1: Custo de Compra de Equipamento para a turbina a gás estudada em função do enriquecimento de oxigênio

<b>Equipamento</b>	<b>CCE<sub>k</sub> [\$] - 21% O<sub>2</sub></b>	<b>CCE<sub>k</sub> [\$] - 24% O<sub>2</sub></b>	<b>CCE<sub>k</sub> [\$] - 27% O<sub>2</sub></b>	<b>CCE<sub>k</sub> [\$] - 30% O<sub>2</sub></b>
<b>Compressor 1</b>	522355	517641	513934	510941
<b>Intercooler</b>	282609	282609	282609	282609
<b>Compressor 2</b>	522355	517641	513934	510941
<b>Regenerador</b>	239199	262466	235332	235382
<b>Câmara de Combustão</b>	532408	568678	602517	634329
<b>Turbina</b>	1517903	1518988	1519840,5	1520528,9

Tabela 6.2: Custo de Investimento, Operação e Manutenção de equipamentos para a turbina a gás estudada em função do enriquecimento de oxigênio.

<b>Equipamento</b>	<b>Z<sub>k</sub> [\$ /h] - 21% O<sub>2</sub></b>	<b>Z<sub>k</sub> [\$ /h] - 24% O<sub>2</sub></b>	<b>Z<sub>k</sub> [\$ /h] - 27% O<sub>2</sub></b>	<b>Z<sub>k</sub> [\$ /h] - 30% O<sub>2</sub></b>
<b>Compressor 1</b>	29,14	28,88	28,67	28,50
<b>Intercooler</b>	15,77	15,77	15,77	15,77
<b>Compressor 2</b>	29,14	28,88	28,67	28,50
<b>Regenerador</b>	13,34	14,64	13,13	13,13
<b>Câmara de Combustão</b>	29,70	31,73	33,61	35,39
<b>Turbina</b>	84,68	84,74	84,79	84,83

Tabela 6.3: Valores de exergia Total, Taxa de Custo Exergético e de Custo Exergético.

	<b>Exergia Total [MW]</b>				<b>Taxa de Custo Exergético [\$ /h]</b>				<b>Custo Exergético [\$/GJ]</b>			
	<b>21%O<sub>2</sub></b>	<b>24%O<sub>2</sub></b>	<b>27%O<sub>2</sub></b>	<b>30%O<sub>2</sub></b>	<b>21%O<sub>2</sub></b>	<b>24%O<sub>2</sub></b>	<b>27%O<sub>2</sub></b>	<b>30% O<sub>2</sub></b>	<b>21% O<sub>2</sub></b>	<b>24%O<sub>2</sub></b>	<b>27% O<sub>2</sub></b>	<b>30%O<sub>2</sub></b>
Ponto 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Ponto 2	10,07	9,98	9,91	9,85	201	222	239	252	5,54	6,19	6,70	7,10
Ponto 3	8,25	8,17	8,12	8,07	164	182	196	206	5,54	6,19	6,70	7,10
Ponto 4	19,14	18,96	18,83	18,72	412	453	485	509	5,98	6,64	7,15	7,56
Ponto 5	32,32	32,04	31,82	31,64	696	766	819	861	5,98	6,64	7,15	7,56
Ponto 6	8,41	7,13	6,12	5,30	181	170	158	144	5,98	6,64	7,15	7,56
Ponto 7	23,91	24,91	25,70	26,34	515	595	662	717	5,98	6,64	7,15	7,56
Ponto 8	0,00	0,25	0,44	0,59	0	91	163	222	103	103,5	103,5	103,5
Ponto 9	8,41	6,57	5,33	4,46	181	262	321	366	5,98	11,07	16,73	22,79
Ponto 10	63,51	63,90	64,22	64,47	689	694	697	700	3,02	3,02	3,02	3,02
Ponto 11	59,93	59,44	59,10	58,85	900	987	1052	1101	4,17	4,61	4,94	5,20
Ponto 12	77,49	77,51	77,53	77,54	1415	1583	1713	1818	5,07	5,67	6,27	6,51
Ponto 13	24,56	24,58	24,60	24,62	587	646	693	730	6,64	7,30	7,82	8,24
Ponto 14	8,46	8,47	8,47	8,48	316	349	372	392	10,37	11,43	12,19	12,84

Tabela 6.4: Valores de Exergia Destruída e Diferença Relativa de Custo para a turbina modelada.

<b>Equipamento</b>	<b>Exergia Destruída - E<sub>d</sub> [kW]</b>				<b>Diferença Relativa de Custo - r [%]</b>			
	<b>21% O<sub>2</sub></b>	<b>24% O<sub>2</sub></b>	<b>27% O<sub>2</sub></b>	<b>30% O<sub>2</sub></b>	<b>21% O<sub>2</sub></b>	<b>24% O<sub>2</sub></b>	<b>27% O<sub>2</sub></b>	<b>30%O<sub>2</sub></b>
Compressor 1	<b>1085</b>	<b>1075</b>	<b>1068</b>	<b>1062</b>	<b>2,61</b>	<b>1,69</b>	<b>0,96</b>	<b>0,37</b>
Intercooler	<b>817</b>	<b>809</b>	<b>804</b>	<b>799</b>	<b>159,60</b>	<b>152,00</b>	<b>147,10</b>	<b>143,70</b>
Compressor 2	<b>1086</b>	<b>1076</b>	<b>1069</b>	<b>1062</b>	<b>8,10</b>	<b>7,30</b>	<b>6,78</b>	<b>6,42</b>
Regenerador	<b>2909</b>	<b>3038</b>	<b>3140</b>	<b>3222</b>	<b>28,07</b>	<b>29,28</b>	<b>29,24</b>	<b>29,78</b>
Câmara de Combustão	<b>11994</b>	<b>11033</b>	<b>10453</b>	<b>10076</b>	<b>24,11</b>	<b>22,50</b>	<b>21,57</b>	<b>21,01</b>
Turbina	<b>2924</b>	<b>2923</b>	<b>2922</b>	<b>2922</b>	<b>30,78</b>	<b>28,77</b>	<b>27,47</b>	<b>26,56</b>

Os resultados encontrados na simulação mostraram que o processo de *OEC* pode trazer algumas vantagens em termos de exergia ao sistema térmico.

A exergia destruída  $E_d$  (Tabela 6.4), considerando as aproximações adotadas, apresentou uma redução conforme cresceu o nível de enriquecimento da corrente de oxidante. O equipamento que mais apresentou redução da exergia destruída foi a câmara de combustão que atingiu redução de 16% do valor original. Esse comportamento foi notado em todos os componentes do sistema térmico, com exceção do regenerador. Com ajuda da tabela 6.3, pode-se verificar que os pontos de saída do regenerador (pontos 5 e 14) tiveram uma menor redução de exergia do que os pontos de entrada (pontos 4 e 13). Relembrando a equação (3.21), juntamente com a Tabela 3.1, na medida em que há a redução da exergia do combustível em relação à exergia do produto, confirma-se que a destruição de exergia no equipamento diminuiu.

No caso do regenerador, essa variação pode ser explicada pelo fato de haver uma leve redução da vazão molar  $\dot{n}_4$  enquanto aumenta a vazão de  $O_2$  no ponto 8, para fins de fechamento de balanço químico da equação de combustão (Tabela 6.5). Assim, a variação da corrente fria (pontos 4 e 5), por possuir uma menor quantidade de elementos químicos, sofreu maiores variações do que corrente quente (pontos 13 e 14), com maior quantidade de massa.

Tabela 6.5 Vazão molar  $\dot{n}_4$  e  $\dot{n}_{13}$  [kmol/s].

$\dot{n}_4$				$\dot{n}_{13}$			
21% $O_2$	24% $O_2$	27% $O_2$	30% $O_2$	21% $O_2$	24% $O_2$	27% $O_2$	30% $O_2$
2,789	2,773	2,753	2,737	2,874	2,874	2,874	2,874

A Taxa de Custo de Exergia Destruída,  $\hat{C}_d$ , representa a quantidade de exergia desperdiçada por equipamento. Os dados contidos no Gráfico 6.1 apresentam um aumento dessa taxa juntamente com o aumento do volume de  $O_2$  na corrente de comburente. Todos os equipamentos do sistema apresentaram esse comportamento. Apesar de aparentar um ponto negativo no processo de *OEC*, esse índice não pode ser avaliado separadamente.

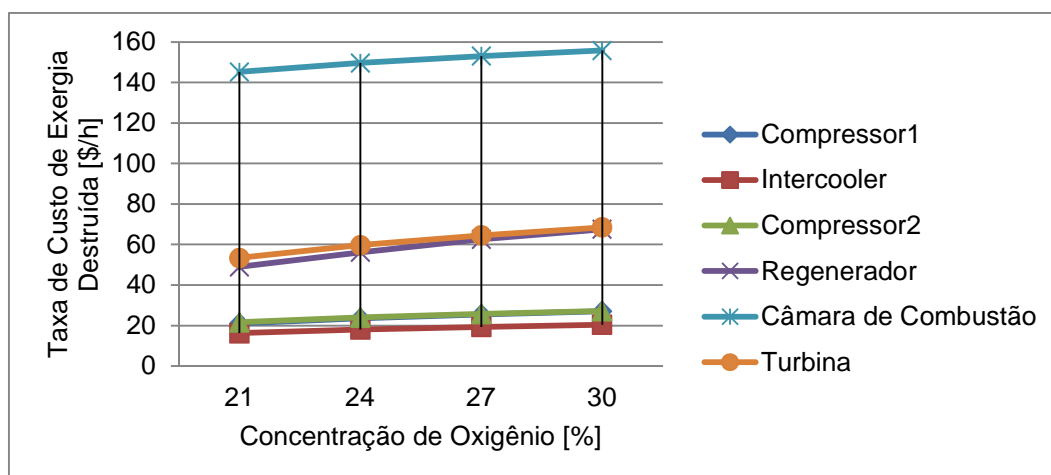


Gráfico 6.1: Variação da Taxa de Custo de Exergia Destruída no processo de *OEC*.

A taxa  $\hat{C}_d$  relaciona a exergia destruída por equipamento com o custo de combustível por equipamento. Conforme visto anteriormente, a exergia destruída por equipamento tem diminuído com o aumento da vazão de oxigênio. Dessa forma, a única maneira de haver aumento na taxa de custo de exergia destruída é havendo aumento no custo de combustível, conforme equação (3.23). Verificando a variação desse custo no Gráfico 6.2, esse comportamento é confirmado. Esse aumento é previsível na medida em que aumenta o custo de  $O_2$  a ser injetado com o aumento de sua vazão molar, refletindo o aumento no custo deste combustível.

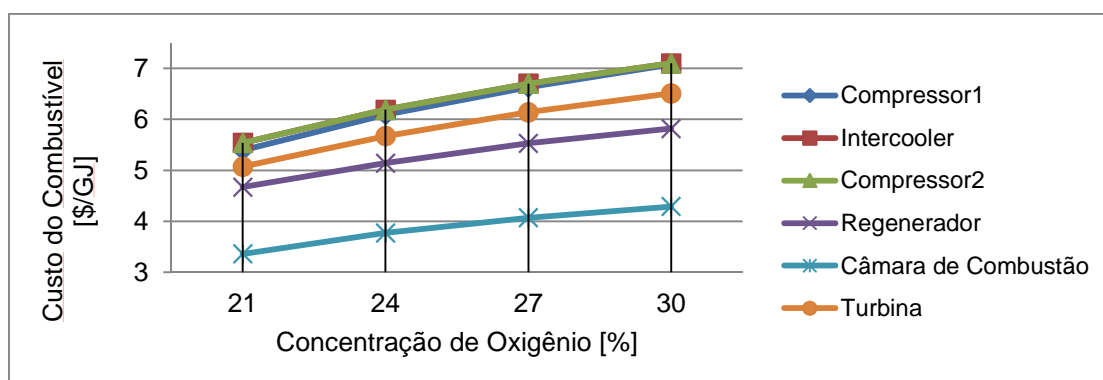


Gráfico 6.2: Variação do Custo do Combustível com o aumento da concentração de  $O_2$ .

A redução apresentada pela Diferença Relativa de Custo,  $r$ , na Tabela 6.4 demonstra que o aumento no custo do produto foi inferior ao aumento provocado no custo do combustível, conforme eq. 3.24. Esse dado pode ser confirmado na Tabela 2 do Apêndice B. A redução apresentada neste índice representa um melhoramento no desempenho do equipamento, uma vez que quanto menor a diferença entre custo do produto e custo de combustível, melhor será o aproveitamento de recursos.

O regenerador apresentou variações na Diferença Relativa de Custo, mas, apesar dos poucos dados simulados, há uma tendência a aumentar essa diferença. Determinar com exatidão a causa dessa variação não é simples, porém pode ser explicada, novamente, pela redução da vazão na corrente fria, o que provocaria um aumento no seu custo muito maior que o aumento na corrente quente, que mantém uma vazão quase constante.

O Fator Exergoeconômico  $f$  (gráfico 6.3) tem grande importância, uma vez que relaciona o custo com investimento no equipamento com o custo de exergia destruída. Se esse fator assumir valores muito altos, significa que o custo com equipamento é a principal causa do custo do produto. Senão, atingindo um baixo valor de  $f$ , significa que a exergia destruída é quem provoca aumento no custo do produto. Os compressores apresentam certo equilíbrio, havendo uma leve tendência ao custo do equipamento. A turbina apresenta o maior fator, o que é justificado uma vez que assume o valor individual de custo de equipamento, conforme Tabela 6.1. O regenerador apresenta um baixo  $f$ , de maneira que a principal causa do custo do produto é a exergia destruída. O mesmo se dá com o *intercooler*, porém com valores bem mais altos. A câmara de combustão apresenta valores baixos de  $f$ , o que representa uma grande taxa de destruição de exergia, porém os valores aumentam a partir do enriquecimento com  $O_2$ , o que representa uma elevação nos custos desse equipamento, o que poderia ser explicado pela necessidade de materiais mais caros para conter o aumento da temperatura de chama adiabática.

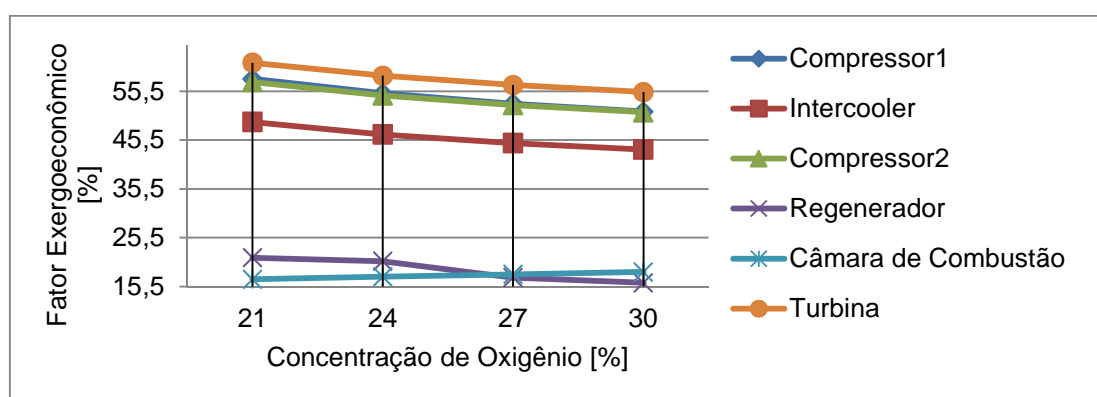


Gráfico 6.3: Fator Exergoeconômico.

Com exceção da câmara de combustão, todos os valores de fator exergoeconômico diminuem com o enriquecimento de  $O_2$ . Este comportamento está adequado, uma vez que o valor de  $Z_k$ , normalmente não varia muito, conforme Tabela 6.2, enquanto que a exergia destruída cresce com o aumento do enriquecimento, conforme visto anteriormente.

Feitas estas análises do resultado, é importante avaliar os modelos de simplificação adotados e a escolha do modelo físico de equipamentos adotados.

Com relação às reações químicas, o modelo de simplificação adotado não foi adequado (considerações 7 e 8 do subcapítulo 3.2), uma vez provocou um aumento excessivo da temperatura na câmara de combustão conforme Tabela 6.6. Boyce, 2002, relata que câmaras de combustão normalmente atingem temperaturas entre  $1871^\circ\text{C}$  a  $1927^\circ\text{C}$ . No entanto, apesar dos valores atingidos se mostrarem muito superiores aos valores normalmente encontrados, convém lembrar que Baukal, 1998, relata o aumento da temperatura de chama adiabática em processos de OEC.

Tabela 6.6 Temperaturas atingidas na câmara de combustão para a turbina a gás estudada em função do enriquecimento de oxigênio.

% $O_2$	21%	24%	27%	30%
Temperatura [K]	2630	2809	2976	3133

A metodologia adotada depende dessa temperatura para estimar o valor monetário da câmara de combustão, conforme equação 2 no Anexo B. Esta equação leva esta temperatura a interferir no índice do expoente de uma equação exponencial, fazendo com que este custo atingisse valores excessivamente altos. Uma vez que a taxa de custo exergético é calculada a partir de um sistema de equações a partir dos custos individuais de todos os equipamentos, esse aumento provocou uma elevação de todos os valores de  $\hat{C}$ .

Para resolver esse problema, tendo em vista que a metodologia adotada não prevê valores máximos e nem mínimos para aplicação, tomou-se por base o problema CGAM (BEJAN *et al* 1996), e realizou-se uma linearização entre os valores de temperatura e custos de câmara de combustão. Para tanto, utilizou-se temperaturas próximas ao do caso modelo para calcular custos de acordo com a metodologia adotada e encontrar novos pontos que possibilitassem a interligação por uma curva linear. A partir disso, com o auxílio do *software CurveExpert* (<http://www.curveexpert.net/>), encontrou-se os parâmetros para uma reta que ligasse os pontos, com coeficiente de determinação,  $R^2$ , superior a 0,98. Assim, foi possível encontrar novos valores para os custos da câmara de combustão que estejam em uma faixa de valor mais próximo as dos demais equipamentos.

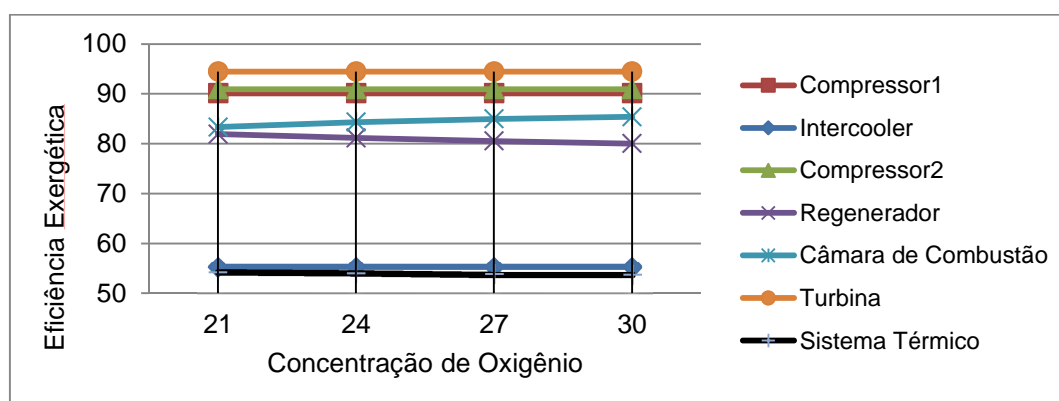


Gráfico 6.4: Eficiência Exergética para a turbina a gás estudada no processo de OEC.

Com relação à planta do sistema térmico modelada, a utilização de um regenerador não se mostrou a melhor escolha do ponto de vista exergético. O equacionamento para cálculo de eficiência se encontra no Anexo C. O Gráfico 6.4 apresenta os dados de eficiência exergética dos equipamentos e a exergia total do sistema. O regenerador apresenta uma redução de sua

eficiência exergética, tendo em vista a redução relativa de sua vazão molar na corrente fria (pontos 4 e 5) com a injeção de  $O_2$ , ao passo que a vazão molar na corrente quente (pontos 13 e 14) se mantém quase constante. Da mesma forma, a eficiência exergética total do sistema apresenta uma redução devido ao mau aproveitamento da exergia inserida no sistema. Apesar de causar um aumento no rendimento térmico do sistema, a opção pela utilização de um regenerador ao invés de um sistema de cogeração, por exemplo, não permitiu que o aumento na exergia após a turbina (Tabela 6.3, ponto 13) revertesse em favor do aumento da eficiência exergética do sistema, conforme equação 2 do Anexo C.

Tabela 6.10: Custos anualizados para a turbina a gás estudada em função do *OEC*.

	21% $O_2$	24% $O_2$	27% $O_2$	30% $O_2$
$A_{\text{combustível}}$	5132000	5165000	5190000	5210000
$A_{O_2}$	0	681070	1217000	1649000
$A_{O\&M}$	798343	809643	809674	815539
$A_{IT}$	704099	714065	714093	719265

Analisando de forma global, o processo de *OEC* parece trazer vantagens com relação à destruição de exergia causada em equipamentos. Porém, é importante reparar que os custos com equipamentos (Tabelas 6.1 e 6.2) e com combustível e oxigênio (Tabela 6.10) podem desaconselhar a utilização deste método. O custo da turbina apresentou um aumento de aproximadamente 1,7%, enquanto a câmara de combustão apresentou aumento de 17% de seu valor original. A exergia existente no sistema após a turbina demonstrou um leve aumento (Tabela 6.3), porém este aumento não reverteu em favor do sistema devido aos equipamentos instalados. Porém, novas simulações de outras plantas térmicas parecem ser necessárias para conclusões definitivas.

## CONCLUSÕES

O processo de combustão enriquecida com oxigênio trouxe variações exergéticas que modificaram o desempenho do sistema térmico. Na maioria dos equipamentos, houve redução da exergia destruída, proporcionando um acréscimo da exergia disponível no sistema. A taxa de custo de exergia destruída aumentou em todos os equipamentos. Esse aumento ocorreu devido à majoração dos valores de custo de combustível, causada por gastos crescentes advindos do abastecimento de oxigênio. Por outro lado, de forma geral, houve redução no índice Diferença Relativa de Custos, pois o aumento do custo do produto foi inferior ao ocorrido no custo do combustível, caracterizando uma ampliação dos recursos disponíveis. Por fim, o fator exergoeconômico apresentou comportamento esperado, com a turbina assumindo maiores valores, devido ao seu maior custo individual, e com os trocadores de calor atingindo baixos valores de porcentagem, em consequência da destruição de exergia normalmente causada nesse tipo de equipamento. O processo de *OEC*, de forma geral, causou uma diminuição do índice  $f$ , devido ao crescimento da taxa de exergia destruída relativamente comparando com a elevação do custo de investimento, operação e manutenção.

O processo de *OEC* se mostrou uma alternativa que pode trazer vantagens se aplicada em sistemas térmicos reais. Entretanto, o aumento de custos causado em equipamentos, manutenção, combustíveis e, principalmente, com abastecimento de oxigênio, pode acabar trazendo desvantagens econômicas. Dessa forma, novas simulações devem ser realizadas em outros modelos de plantas de turbinas a gás, a fim de avaliar as vantagens e desvantagens que podem advir da utilização desta tecnologia.

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se realizar novas simulações considerando-se as emissões do processo da reação de combustão. Da mesma forma, realizar um estudo quanto a viabilidade da produção de oxigênio, a partir de métodos como *PSA – Pressure Swing Adsorption*, ou *TSA – Temperature Swing Adsorption*, que viriam a diminuir os custos com o abastecimento de oxigênio. Outra análise de grande interesse seria aplicar uma análise exergética em um processo de combustão enriquecida com oxigênio acoplado de um

sistema de cogeração, avaliando a variação de exergia junto a este sistema. Por fim, avaliar o desempenho de um sistema que possuísse equipamentos voltados à preservação ambiental, como lavadores de gases.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAUKAL, C. E. **Oxygen Enhanced Combustion**. Boca Raton: CRC Press LCC, 1998.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal Design and Optimization**. John Wiley & Sons, Inc., 1996. 542 p.
- BOEIRA, W. S. **Análise do comportamento de uma turbina a gás operando com combustão enriquecida com oxigênio**. Trabalho de Conclusão de Curso, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, 2010.
- BOEIRA, W. S.; DE TONI JÚNIOR, A. R.; MAIDANA, C. F.; SCHNEIDER, P. S.; ZIMMER, L. **Efficiency of gas turbine assemblies operating under oxygen enhanced combustion (OEC)**. Aceito no 2nd Oxyfuel Combustion Conference. 2011.
- BOYCE, M. P. **Gas Turbine Engineering Handbook**, Gulf Professional Publishing, Houston, 2002.
- COHEN, H.; ROGERS G. F. C., SARAVANAMUTTO, H. I. H.; **Gas Turbine Theory**, Lougman Group, London, 1996.
- DOS SANTOS, J. C. A; **Análise Energética e Exergética de Plantas de Co-Geração**. Dissertação de mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, 2005.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Nacional de Energia – PNE 2030. 2007. Disponível em <[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>. Acesso em 12 jun. 2011.
- HORBANIUC, B.; MARIN, O.; DUMITRASCU, G.; CHARON, O. **The Influence of the Compression Interstage Cooling by Adiabatic Humidification of the Steam Injection and the Oxygen Enriched Combustion Upon the Gas Turbine Co-generation Systems**, Proceedings of the 2nd Heat Powered Cycles Conference Conservatoire national des arts et métiers, Paris, 2001.
- MAIDANA, C. F.; CAROTENUTO, A. R. S.; SCHNEIDER, P. S. **Analysis of Oxygen Enhanced Combustion of Gas Power Cycle**. Publicado nos anais do Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2010.
- MORAN, M.J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002. 681 p.
- POOLA, B.R.; SEKAR, R. ASSANIS, D. N.; CATALDI, G.R. **Study of using oxygen enriched combustion air for locomotive diesel engines**. 1996. Disponível em <[www.scienceaccelerator.gov](http://www.scienceaccelerator.gov)>. Acesso em 12 abr. 2011.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 7ª Ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2009. 659 p.
- WU, K. K.; CHANG, Y. C.; CHEN, C. H.; CHEN, Y. D. **High Efficiency combustion of natural gas with 21 – 30% oxygen-enriched air**. Fuel. n. 89. fev. 2010. Disponível em <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>. Acesso em 02 jun. 2011.



## APÊNDICE A

Este apêndice é composto de parâmetros utilizados na simulação e índices econômicos estimados para aplicação da metodologia de análise exergoeconômica.

Tabela 1: Condições de Operação de cada Equipamento.

Compressores de Ar e <i>Intercooler</i>		Regenerador	
$T_1 = 298,15 \text{ K}$ ; $P_1 = 1,03 \text{ bar}$ Fração Molar: $x_{O_2} = 0,21$ ; $x_{N_2} = 0,79$ Razão de Compressão: $r_{c1} = r_{c2} = 3,16$ Eficiências: $\eta_{c1} = \eta_{c2} = 0,86$ ; $\eta_i = 0,80$		$T_{14} = 298,15 \text{ K}$ ; $P_{14} = 1,03 \text{ bar}$ Efetividade do Regenerador: $\epsilon_{reg} = 0,75$	
Injetor de Oxigênio		Injetor de Metano	
$T_8 = 298,15 \text{ K}$ ; $P_8 = 12 \text{ bar}$ Fração Molar: $x_{O_2} = 1$ ; $x_{N_2} = 0$		$T_{10} = 298,15 \text{ K}$ ; $P_{10} = 12 \text{ bar}$ Fração Molar: $x_{CH_4} = 1$	
Misturador		Turbina	
$T_{12} = 1373,15 \text{ K}$		Eficiência: $\eta_t = 0,86$ Potência Nominal: 50.000 W	

Tabela 2: Estimativa de custos diretos e indiretos incidentes a partir de Bejan *et al* (1996).

Instalação de Equipamentos	45%	Engenharia e Supervisão	30%
Tubulações	35%	Contrato de Construção	15%
Instrumentação e Controle	10%	Contingências e Imprevistos	20%
Instalação Elétrica e Materiais	11%	Início de Operação	7%
Terreno	10%	Capital de Giro	15%
Construção Civil e Projeto Arquitetônico	60%	Licenças e Impostos	10%
Serviços e Utilidades	65%	Reserva de Fundos Utilizados durante a Construção	15%

Tabela 3: Fatores econômicos e de operação utilizados.

Vida Útil Esperada	VU	20 anos
Inflação Anual Projetada	$i_{ca}$	6%
Aumento Anual Esperado sobre o Combustível	$ia_{comb}$	6%
Aumento Anual Esperado sobre o Oxigênio	$ia_{O_2}$	4%
Taxa de Juros anual sobre capital de terceiros	$i_{c_{terc}}$	12%
Remuneração anual sobre capital próprio	$i_{c_{prop}}$	14%
Fração de Capital Próprio	FCP	30%
Fração de Capital de Terceiros	FCT	70%
Custo do Combustível Atual	$c_{comb}$	0,1584 \$/kg de Metano
Custo do Oxigênio Puro	$c_{O_2}$	0,0387 \$/kg de Oxigênio puro
Tempo de Operação anual dos sistemas	TOA	7446 hora/ano (85% do ano)
Custo Anual de Operação de Manutenção	$C_{O\&M}$	5%

O valor do  $c_{comb}$  é calculado a partir de uma aproximação do preço do metano com o preço do gás natural informado no site da Sul Gás (<http://www.sulgas.rs.gov.br/>). Essa aproximação foi realizada tendo em vista o gás natural ser composto por aproximadamente 90% por metano. Já o valor do  $c_{O_2}$  foi considerado a partir de informação da empresa Air Liquide ([http://www.br.airliquide.com/pt\\_BR/air-liquide-brasil.html](http://www.br.airliquide.com/pt_BR/air-liquide-brasil.html)). Os demais valores foram estimados uma vez que a sua determinação exata não é o objetivo do presente trabalho.

## APÊNDICE B

Este apêndice é composto por resultados encontrados no modelamento da turbina a gás operando com processo de combustão enriquecida com oxigênio.

Tabela 1: Valores de Exergia Destruída para a turbina a gás estudada.

Equipamento	Taxa de Custo de Exergia Destruída – $\dot{C}_d$ [\$/h]				Fator Exergoeconômico - f [%]			
	21% O <sub>2</sub>	24% O <sub>2</sub>	27% O <sub>2</sub>	30% O <sub>2</sub>	21% O <sub>2</sub>	24% O <sub>2</sub>	27% O <sub>2</sub>	30% O <sub>2</sub>
Compressor 1	21,07	23,56	25,49	27,04	58,03	55,07	52,93	51,32
Intercooler	16,27	18,03	19,37	20,43	49,21	46,65	44,87	43,56
Compressor 2	21,64	23,98	25,76	27,17	57,38	54,64	52,67	51,20
Regenerador	48,93	56,17	62,53	67,55	21,43	20,68	17,35	16,28
Câmara de Combustão	145,2	149,6	153	155,8	16,98	17,50	18,01	18,51
Turbina	53,41	59,69	64,57	68,48	61,32	58,67	56,77	55,33

Tabela 2: Custo de Combustível e Custo do Produto para a turbina a gás estudada em função do enriquecimento de oxigênio.

Equipamento	Custo do Combustível [\$/GJ]				Custo do Produto [\$/GJ]			
	21% O <sub>2</sub>	24% O <sub>2</sub>	27% O <sub>2</sub>	30% O <sub>2</sub>	21% O <sub>2</sub>	24% O <sub>2</sub>	27% O <sub>2</sub>	30% O <sub>2</sub>
Compressor 1	5,39	6,09	6,63	7,08	5,54	6,19	6,70	7,10
Intercooler	5,54	6,19	6,70	7,10	14,37	15,59	16,54	17,31
Compressor 2	5,54	6,19	6,70	7,10	5,98	6,64	7,15	7,56
Regenerador	4,67	5,14	5,53	5,82	5,98	6,64	7,15	7,56
Câmara de Combustão	3,36	3,77	4,07	4,29	4,17	4,61	4,94	5,20
Turbina	5,07	5,67	6,14	6,51	6,64	7,30	7,82	8,24

Tabela 3: Eficiência Exergética dos equipamentos e do sistema.

Equipamento	Eficiência Exergética			
	21% O <sub>2</sub>	24% O <sub>2</sub>	27% O <sub>2</sub>	30% O <sub>2</sub>
Compressor 1	0,9012	0,9012	0,9012	0,9012
Intercooler	0,5522	0,5522	0,5522	0,5522
Compressor 2	0,9093	0,9093	0,9093	0,9093
Regenerador	0,8193	0,8115	0,8054	0,8004
Câmara de Combustão	0,8332	0,8434	0,8497	0,8538
Turbina	0,9448	0,9448	0,9448	0,9448
Eficiência do Sistema	0,5417	0,5397	0,5382	0,5370



## ANEXO A

Tabela 1: Exergia Química Padrão Molar,  $e_k^{CH}$  [kJ/kmol] a 298 K e  $P_o$ .

Substância	Fórmula Química	Modelo I <sup>a</sup>	Modelo II <sup>b</sup>
Nitrogênio	N <sub>2</sub> (g)	639,00	720,00
Oxigênio	O <sub>2</sub> (g)	3.951,00	3.970,00
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub> (g)	14.176,00	19.870,00
Água	H <sub>2</sub> O(g)	8.636,00	9.500,00
Água	H <sub>2</sub> O(l)	45,00	900,00
Metano	CH <sub>4</sub> (g)	824.348,00	831.650,00

No Modelo I,  $P_o = 1,019$  atm. Este modelo tenta impor um critério no qual o ambiente de referência encontra-se em equilíbrio. As substâncias de referência são determinadas admitindo-se equilíbrio químico restrito para ácido nítrico e nitratos e equilíbrio termodinâmico irrestrito para todos os outros componentes químicos da atmosfera, dos oceanos e uma porção da crosta da Terra. A composição química da fase gasosa deste modelo aproxima-se da composição da atmosfera natural [MORAN e SHAPIRO, 2002].

No Modelo II,  $P_o = 1,0$  atm. No desenvolvimento deste modelo uma substância de referência é selecionada para cada elementos químico dentre substâncias que contenham o elemento em análise e que se abundantemente presentes no ambiente natural mesmo que as substâncias não estejam em equilíbrio mútuo completo. Um motivo importante para este procedimento está no fato de que as substâncias encontradas abundantemente na natureza possuem valor econômico baixo. De um modo geral, a composição química do ambiente de referência para exergia do Modelo II é mais próxima do ambiente natural do que aquele do Modelo I, mas o critério de equilíbrio nem sempre é satisfeito [MORAN e SHAPIRO, 2002].

## ANEXO B

Tabela 1: Equações para estimativa de Custos de Compra de Equipamentos ( $CCE_k$ ).

Compressor	$CCE_{compressor} = \left( \frac{C_{11} \dot{m}_a}{C_{12} - \eta_{ic}} \right) \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (1)$
Câmara de Combustão	$CCE_{câmara\_de\_combustão} = \left( \frac{C_{21} \dot{m}_a}{C_{22} - \frac{P_{11}}{P_9}} \right) [1 + \exp(C_{23} T_{11} - C_{24})] \quad (2)$
Turbina	$CCE_{turbina} = \left( \frac{C_{33} \dot{m}_g}{C_{32} - \eta_{it}} \right) \ln \left( \frac{P_{13}}{P_{12}} \right) [1 + \exp(C_{33} T_{12} - C_{34})] \quad (3)$
Trocador de Calor	$CCE_{trocador\_de\_calor} = C_{41} \left( \frac{m_g (h_{13} - h_{14})}{U(\Delta T_{ml})} \right)^{0,6} \quad (4)$

Obs: Os índices constantes nas presentes equações foram adaptados para a planta térmica estudada.

$\dot{m}_a$  e  $\dot{m}_g$  representam a vazão mássica [kg/s] de ar e dos gases de combustão respectivamente.  $\eta_{ic}$  e  $\eta_{it}$  representam as eficiências isoentrópicas do compressor e da turbina respectivamente.  $P$  representa a pressão [bar].  $U$  é o Coeficiente Global de Transferência de Calor.  $\Delta T_{ml}$  representa a temperatura média logarítmica do trocador de calor.

Tabela 2: Constantes utilizadas nas equações da Tabela 1.

Compressor	$C_{11} = 71,10 \text{ \$/ (kg/s)}$	$C_{12} = 0,9$
Câmara de Combustão	$C_{21} = 46,08 \text{ \$/ (kg/s)}$ $C_{23} = 0,018 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$C_{22} = 0,095$ $C_{24} = 26,4$
Turbina	$C_{31} = 479,34 \text{ \$/ (kg/s)}$ $C_{33} = 0,036 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$C_{32} = 0,92$ $C_{34} = 54,4$
Trocador de Calor	$C_{41} = 4122 \text{ \$/ (m}^{1,2}\text{)}$	$U = 18 \text{ W / (m}^2\text{K)}$

## ANEXO C

Equacionamento para cálculo da Eficiência Exergética

a) Eficiência Exergética de um sistema de cogeração

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{W}_{\text{líquido}} + (\dot{E}x_{\text{vapor\_saturado}} - \dot{E}x_{\text{água\_líquida}})}{\dot{E}x_{\text{ar\_atmosférico}} + \dot{E}x_{\text{combustível}}} \quad (1)$$

b) Eficiência Exergética de uma turbina sem cogeração

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{W}_{\text{líquido}} + \dot{E}x_{\text{gases\_de\_combustão}}}{\dot{E}x_{\text{ar\_atmosférico}} + \dot{E}x_{\text{combustível}}} \quad (2)$$

c) Eficiência Exergética de um combustor

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{E}x_{\text{gases\_de\_combustão}}^{Ph} + \dot{E}x_{\text{gases\_de\_combustão}}^{Ch}}{\dot{E}x_{\text{ar\_atmosférico}}^{Ph} + \dot{E}x_{\text{ar\_atmosférico}}^{Ch} + \dot{E}x_{\text{combustível}}^{Ph} + \dot{E}x_{\text{combustível}}^{Ch}} \quad (3)$$

d) Eficiência Exergética de um compressor

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{E}x_{\text{sai}} - \dot{E}x_{\text{entra}}}{\dot{W}_{\text{compressor}}} \quad (4)$$

e) Eficiência Exergética de um Trocador de Calor

➤ Aquecimento de corrente fria

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{E}x_{\text{Frio\_sai}} - \dot{E}x_{\text{Frio\_entra}}}{\dot{E}x_{\text{quente\_entra}} - \dot{E}x_{\text{quente\_sai}}} \quad (5)$$

➤ Resfriamento de corrente quente

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{E}x_{\text{quente\_entra}} - \dot{E}x_{\text{quente\_sai}}}{\dot{E}x_{\text{frio\_sai}} - \dot{E}x_{\text{frio\_entra}}} \quad (6)$$