

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Avaliação termodinâmica da incorporação de sistemas de  
reaquecimento e regeneração nos sistemas de cogeração no  
setor sucroalcooleiro brasileiro**

**Álvaro Adolfo Díaz Pérez**

**Itajubá, julho de 2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Álvaro Adolfo Díaz Pérez**

**Avaliação termodinâmica da incorporação de sistemas de  
reaquecimento e regeneração nos sistemas de cogeração no  
setor sucroalcooleiro brasileiro**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica como  
parte dos requisitos para obtenção do Título  
de Mestre em Ciências em Engenharia  
Mecânica.**

**Área de Concentração: TÉRMICA,  
FLUIDOS E MAQUINAS DE FLUXO**

**Orientador: Prof. Dr. José Carlos Escobar Palácio**

**Co-orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

**Julho de 2016**

**Itajubá**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Álvaro Adolfo Díaz Pérez**

**Avaliação termodinâmica da incorporação de sistemas de  
reaquecimento e regeneração nos sistemas de cogeração no  
setor sucroalcooleiro brasileiro**

**Dissertação aprovada por banca examinadora em 15  
de julho de 2016, conferindo ao autor o título de  
Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. José Carlos Escobar Palácio (Orientador)**

**Prof. Dr. Osvaldo José Venturini (Co-orientador)**

**Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos**

**Prof. Dr. Roberto Akira Yamachita**

**Prof. Dr. Arnaldo Martin Martinez Reyes**

**Itajubá**

**2016**

*Dedico este trabalho*

*Aos meus pais, Álvaro de Jesús e Judith*

*A minha irmã Zayda Tatiana*

*Aos meus avós*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por dar-me a oportunidade de viver, por estar comigo em cada passo que dou, por fortalecer meu coração e iluminar a minha mente e por ter colocado em meu caminho pessoas que tem sido meu suporte e companhia durante o mestrado.

Ao meu pai, Álvaro de Jesús, a minha mãe, Judith e à minha irmã, Zayda Tatiana, pelo carinho, dedicação, educação e apoio em cada passo da minha vida.

A toda minha família, pelo apoio ao meu projeto de vida.

A Maíra Defendi, pelo carinho, atenção, amizade e incentivo.

Ao professor José Carlos Escobar Palácio, meu orientador, pela amizade, orientação e incentivo. Agradeço pela confiança depositada em mim durante esta etapa.

Ao Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pela oportunidade e apoio fundamental em relação ao desenvolvimento desse trabalho e à minha formação, em especial aos professores envolvidos Osvaldo Venturini, Arnaldo Martinez e Electo Eduardo Silva Lora.

Aos todos os amigos do NEST, Pedro Pacheco, Edgardo Arrieta, Leidy Mora, Sebastian Mendoza, Gaylord Carrillo, Eric Ocampo, Dimas José Rua, Aline Melo, Germán Lozano, Germán Niño, Jean Velásquez, Victor Patiño, Ana Galindo, Diego Izidoro, Milena Lozano, Felipe Centeno, pela amizade e momentos compartilhados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNIFEI, bem como a todos os professores, pela minha formação.

A CAPES pelo auxílio por meio da linha de financiamento de bolsas de mestrado.

A todas as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

*"La madurez del hombre es haber vuelto a encontrar la seriedad  
con que jugaba cuando era niño"*

*F. Nietzsche*

## RESUMO

Atualmente, o bagaço obtido na produção de açúcar e álcool é destinado basicamente à geração de energia, nas formas térmica, mecânica e elétrica, sendo a energia obtida pela queima deste resíduo nas caldeiras suficiente para suprir toda a demanda das unidades produtoras e ainda gerar excedentes exportáveis à rede elétrica. Recentemente, a utilização do bagaço em outros setores industriais tem apresentado um crescimento considerável, como nos casos da indústria da polpa e papel, plásticos, tintas e também na produção de etanol lignocelulósico. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma avaliação termodinâmica da implementação do reaquecimento e da regeneração, como forma de aumentar o excedente de bagaço, nos sistemas de cogeração do setor sucroalcooleiro brasileiro. Foi considerado o sistema de cogeração de uma usina de açúcar e álcool que opera com parâmetros de vapor de 85 bar e 520°C. Foram analisados oito cenários, divididos em dois grupos com capacidades de geração de vapor de 265 t/h e 281 t/h. Cada grupo é composto por um cenário base (C0), um cenário com reaquecimento (C1), um cenário regenerativo (C2), no qual o número de regeneradores varia gradativamente de um a oito; e um cenário com reaquecimento e regeneração (C3), variando de igual modo o número de regeneradores de um a oito. Foi utilizado o software GateCycle™ para simulação dos diferentes esquemas. Estabeleceu-se como principais parâmetros de operação a capacidade de moenda de 500 tc/h com moendas eletrificadas, consumo específico de vapor de 450 kg/tc, potência instalada de 50,4 MW para o Grupo I e de 55 MW para o Grupo II, operando com turbinas de extração-condensação. Os indicadores utilizados na avaliação foram o Índice de Bagaço Excedente e a Eficiência Exergética. A comparação indicou o menor rendimento do ciclo quando implementado o Reaquecimento (C1), com incrementos percentuais no bagaço excedente de 1,72% para o Grupo I e 1,86% para o Grupo II e incrementos percentuais na eficiência exergética de 1,75% e 1,90% respectivamente. Quando implementada a Regeneração (C2), os incrementos percentuais no bagaço excedente atingiram a faixa de 4,79 a 5,86% e 4,79 a 7,46% e incrementos percentuais na eficiência exergética de 5,05–6,23% e 5,03–8,07% respectivamente. O maior rendimento foi obtido no cenário com Reaquecimento e Regeneração simultânea (C3), os incrementos percentuais no bagaço excedente com relação ao Cenário Base (C0), atingiram 5,07% para o Grupo I e 5,62 a 7,76% para o Grupo II e incrementos na eficiência exergética de 5,34% e 5,91–8,46% respectivamente.

**Palavras-chave:** Cogeração, reaquecimento, regeneração, sucroalcooleiro, ciclo Rankine.

## ABSTRACT

Currently, the sugarcane bagasse obtained in the production of sugar and alcohol is basically used in power generation in the thermal, mechanical and electrical forms, and the energy obtained by burning this waste in boilers, enough to supply all the demand of the production units and still generate exportable surplus to the grid. Recently, the use of bagasse in other industries has been presenting a considerable increase as in the cases of pulp and paper industry, plastics, inks and also in the production of lignocellulosic ethanol. In this context, the objective of this study is a thermodynamic evaluation of the implementation of reheat and regeneration, in order to increase the bagasse surplus in cogeneration systems of the Brazilian sugar and alcohol sector. Was analyzed a total of eight scenarios under two different sets of operating conditions, the first set with 265 tons of steam delivered per hour (condition I) and the second with 281 tons of steam delivered per hour (condition II). For each set of operating conditions, was used GateCycle™ software to simulate four sceneries: a conventional (C0), reheated (C1), regenerative (C2), with the number of regenerators varying from one to eight; and reheat regenerative (C3) with the number of regenerators varying from one to eight too. The simulated plant operated with steam at 85 bar and 520 °C, used extracting condensing turbine and processed 500 tons of cane/hour with a specific steam consumption of 450 kg /ton of cane. 50,4 MW were generated operating at condition I, and 55 MW at condition II. Were used two indicators: Surplus Bagasse and Exergetic Efficiency. A comparing for Reheating indicates a Surplus Bagasse increase of 1,72% for condition I and 1,86% for condition II and a corresponding increase in exergetic efficiency of 1,75% and 1,90% respectively. For Regenerative (C2) an increase in Surplus Bagasse of 4.79-5.86% and 4,79–7,46% and a corresponding increase in exergetic efficiency of 5.05–6.23% and 5,03–8,07%, and finally for a Reheat Regenerative (C3) indicates a Surplus Bagasse increase of 5,07% for condition I and 5,62–7,76% for condition II and increase in exergetic efficiency of 5.34% and 5,91–8,46% respectively.

**Keywords:** cogeneration, reheating, regeneration, sugar and alcohol production, Rankine cycle.



# ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Diagrama T-s para o ciclo Rankine com reaquecimento .....                                                                                               | 31 |
| Figura 2.2 – Diagrama T-s do ciclo Rankine, processo de adição do calor .....                                                                                        | 32 |
| Figura 2.3 – Ciclo regenerativo com um aquecedor aberto .....                                                                                                        | 33 |
| Figura 2.4 – Ciclo regenerativo com um aquecedor fechado .....                                                                                                       | 34 |
| Figura 2.5 – Diminuição no ganho de eficiência em função do número de aquecedores .....                                                                              | 35 |
| Figura 3.1 – Sistema de cogeração de uma usina sucroalcooleira convencional (C0).....                                                                                | 41 |
| Figura 3.2 – Sistema de cogeração com um estágio de reaquecimento (C1).....                                                                                          | 42 |
| Figura 3.3 – Variações na eficiência térmica do ciclo e do título na saída da turbina de baixa pressão .....                                                         | 43 |
| Figura 3.4 – Sistema de cogeração com um regenerador fechado (C2).....                                                                                               | 45 |
| Figura 3.5 – Sistema de cogeração com múltiplos regeneradores fechados (C2).....                                                                                     | 46 |
| Figura 3.6 – Sistema de cogeração com reaquecimento e regeneração (C3).....                                                                                          | 49 |
| Figura 4.1 – Influência da pressão de reaquecimento sobre o excedente de bagaço.....                                                                                 | 52 |
| Figura 4.2 – Influência da pressão de reaquecimento sobre a eficiência exergética.....                                                                               | 53 |
| Figura 4.3 – Variação da relação de pressão $P_r/P_b$ com a extração de vapor para processo ....                                                                     | 54 |
| Figura 4.4 – Variação percentual no excedente de bagaço no cenário regenerativo (C2) com relação ao cenário base (C0) para o Grupo I. ....                           | 56 |
| Figura 4.5 – Variação percentual relativa no excedente de bagaço no Cenário Regenerativo (C2) com relação ao Cenário Base (C0) para Grupo I .....                    | 57 |
| Figura 4.6 – Variação percentual na eficiência exergética para o sistema com regeneração no Grupo I.....                                                             | 57 |
| Figura 4.7 – Variação percentual no excedente de bagaço para o sistema com regeneração no Grupo II .....                                                             | 59 |
| Figura 4.8 – Variação percentual relativa no excedente de bagaço para o sistema com regeneração no Grupo II .....                                                    | 59 |
| Figura 4.9 – Variação percentual na eficiência exergética para o sistema com regeneração no Grupo II .....                                                           | 60 |
| Figura 4.10 – Comparação da variação percentual no excedente de bagaço entre o sistema com reaquecimento e regeneração (C3) e o cenário base (C0), no Grupo II ..... | 64 |
| Figura 4.11 – Variação percentual no excedente de bagaço para o sistema com reaquecimento e regeneração no Grupo II .....                                            | 65 |

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.12 – Comparação da variação percentual na eficiência exergética entre o sistema com reaquecimento e regeneração (C3) e o caso base (C0) no Grupo II..... | 66 |
| Figura 4.13 – Bagaço excedente com relação ao caso base em tc por safra no Grupo I.....                                                                           | 67 |
| Figura 4.14 – Incremento na eficiência exergética com relação ao caso base no Grupo I.....                                                                        | 68 |
| Figura 4.15 – Bagaço excedente com relação ao caso base em tc por safra no Grupo II .....                                                                         | 69 |
| Figura 4.16 – Incremento na eficiência exergética com relação ao caso base no Grupo II .....                                                                      | 70 |
| Figura 4.17 – Potencial de geração de eletricidade durante a entressafra em MWh, Grupo I .                                                                        | 72 |
| Figura 4.18 – Potencial de geração de eletricidade durante a entressafra em MWh, Grupo II                                                                         | 73 |
| Figura 4.19 – Potencial de incremento na produção de etanol anidro pela adição de uma planta de 2ª geração em litros por safra, Grupo I .....                     | 74 |
| Figura 4.20 – Potencial de incremento na produção de etanol anidro pela adição de uma planta de 2ª geração em litros por safra, Grupo II.....                     | 75 |
| Figura 5.1 – Diagrama de Grassmann para o ciclo convencional .....                                                                                                | 80 |
| Figura 5.2 – Distribuição da exergia para o ciclo convencional .....                                                                                              | 80 |
| Figura 5.3 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento .....                                                                                           | 81 |
| Figura 5.4 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento .....                                                                                         | 81 |
| Figura 5.5 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com um regenerador .....                                                                                          | 82 |
| Figura 5.6 – Distribuição da exergia para o ciclo com um regenerador.....                                                                                         | 82 |
| Figura 5.7 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com dois regeneradores .....                                                                                      | 83 |
| Figura 5.8 – Distribuição da exergia para o ciclo com dois regeneradores.....                                                                                     | 83 |
| Figura 5.9 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com três regeneradores .....                                                                                      | 84 |
| Figura 5.10 – Distribuição da exergia para o ciclo com três regeneradores.....                                                                                    | 84 |
| Figura 5.11 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com quatro regeneradores.....                                                                                    | 85 |
| Figura 5.12 – Distribuição da exergia para o ciclo com quatro regeneradores .....                                                                                 | 85 |
| Figura 5.13 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com cinco regeneradores .....                                                                                    | 86 |
| Figura 5.14 – Distribuição da exergia para o ciclo com cinco regeneradores.....                                                                                   | 86 |
| Figura 5.15 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com seis regeneradores .....                                                                                     | 87 |
| Figura 5.16 – Distribuição da exergia para o ciclo com seis regeneradores .....                                                                                   | 87 |
| Figura 5.17 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com sete regeneradores.....                                                                                      | 88 |
| Figura 5.18 – Distribuição da exergia para o ciclo com sete regeneradores .....                                                                                   | 88 |
| Figura 5.19 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com oito regeneradores.....                                                                                      | 89 |
| Figura 5.20 – Distribuição da exergia para o ciclo com oito regeneradores .....                                                                                   | 89 |
| Figura 5.21 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento e um regenerador...                                                                            | 90 |
| Figura 5.22 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e um regenerador .....                                                                       | 90 |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.23 – Diagrama de Grassmann: ciclo com reaquecimento e dois regeneradores.....     | 91  |
| Figura 5.24 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e dois regeneradores  | 91  |
| Figura 5.25 – Diagrama de Grassmann: ciclo com reaquecimento e três regeneradores.....     | 92  |
| Figura 5.26 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e três regeneradores  | 92  |
| Figura 5.27 – Diagrama de Grassmann: ciclo com reaquecimento e quatro regeneradores ....   | 93  |
| Figura 5.28 – Distribuição da exergia: ciclo com reaquecimento e quatro regeneradores..... | 93  |
| Figura 5.29 – Diagrama de Grassmann: ciclo com reaquecimento e cinco regeneradores.....    | 94  |
| Figura 5.30 – Distribuição da exergia: ciclo com reaquecimento e cinco regeneradores ..... | 94  |
| Figura 5.31 – Diagrama de Grassmann: ciclo com reaquecimento e seis regeneradores .....    | 95  |
| Figura 5.32 – Distribuição da exergia: ciclo com reaquecimento e seis regeneradores.....   | 95  |
| Figura 5.33 – Diagrama de Grassmann: ciclo com reaquecimento e sete regeneradores .....    | 96  |
| Figura 5.34 – Distribuição da exergia: ciclo com reaquecimento e sete regeneradores.....   | 96  |
| Figura 5.35 – Diagrama de Grassmann: ciclo com reaquecimento e oito regeneradores .....    | 97  |
| Figura 5.36 – Distribuição da exergia: ciclo com reaquecimento e oito regeneradores.....   | 97  |
| Figura 5.37 – Exergia destruída com oito regeneradores para cada equipamento .....         | 100 |
| Figura 5.38 – Eficiência Exergética da Caldeira .....                                      | 102 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3.1 – Descrição geral dos sistemas simulados .....                                                                                                                          | 38  |
| Tabela 3.2 – Fluxos de massa dos combustíveis .....                                                                                                                                | 39  |
| Tabela 3.3 – Principais parâmetros de operação .....                                                                                                                               | 40  |
| Tabela 3.4 – Cálculo das pressões ótimas de extração para cada conjunto de regeneradores..                                                                                         | 47  |
| Tabela 4.1 – Consumo de bagaço e produção de vapor para os sistemas convencional (C0) e com reaquecimento (C1). ....                                                               | 50  |
| Tabela 4.2 – Resultados para energia gerada e consumida nos sistemas convencional (C0) e com reaquecimento (C1) .....                                                              | 51  |
| Tabela 4.3 – Resultados para o bagaço excedente e a eficiência exergética nos sistemas convencional (C0) e com reaquecimento (C1).....                                             | 51  |
| Tabela 4.4 – Variação da relação de pressão $P_r/P_b$ com a extração de vapor para processo....                                                                                    | 54  |
| Tabela 4.5 – Consumo de bagaço e produção de vapor para os sistemas convencional (C0) e com regeneração (C2) no Grupo I .....                                                      | 55  |
| Tabela 4.6 – Resultados para o bagaço excedente e a eficiência exergética nos sistemas convencional (C0) e com regeneração (C2), Grupo I.....                                      | 58  |
| Tabela 4.7 – Consumo de bagaço e produção de vapor para os sistemas convencional (C0) e com regeneração (C2) no Grupo II.....                                                      | 58  |
| Tabela 4.8 – Resultados nos ganhos de temperatura de cada regenerador.....                                                                                                         | 61  |
| Tabela 4.9 – Resultados para energia gerada e consumida nos sistemas convencional (C0) e com regeneração (C2).....                                                                 | 62  |
| Tabela 4.10 – Resultados para o bagaço excedente e a eficiência exergética no Cenário Regenerativo (C2) com relação ao Cenário Base (C0) para o Grupo II.....                      | 63  |
| Tabela 4.11 – Consumo de bagaço e produção de vapor para os sistemas convencional (C0) e com reaquecimento e regeneração (C3) no Grupo II .....                                    | 64  |
| Tabela 4.12 – Resultados para o bagaço excedente e a eficiência exergética no Cenário com reaquecimento e regeneração (C3), com relação ao Cenário Base (C0) para o Grupo II ..... | 66  |
| Tabela 5.1 – Exergia destruída em cada equipamento em kW.....                                                                                                                      | 99  |
| Tabela 5.2 – Eficiência exergética da Caldeira .....                                                                                                                               | 101 |

## SIMBOLOGIA

$B_F$  – Exergia do combustível [kW]

$B_P$  – Exergia da eletricidade produzida [kW]

$B_Q$  – Exergia do calor produzido para processo [kW]

$\beta_{cons}$  – Bagaço consumido nas caldeiras [t]

$\beta_{disp}$  – Bagaço disponível [t]

$\beta_{exc}$  – Bagaço de cana excedente [%]

$\dot{E}_d$  – Exergia destruída [kW]

$e_f$  – Exergia do fluxo [kW]

$\eta_{exe}$  – Eficiência exergética [%]

$\Delta\eta_{exe}$  – Variação na Eficiência exergética [%]

$P_b$  – Pressão da Caldeira

$P_c$  – Pressão no Condensador

$P_r$  – Pressão de Reaquecimento

tc – tonelada de cana de açúcar

## Abreviaturas e siglas

1G – Etanol convencional; 1ª geração

2G – Etanol lignocelulósico; 2ª geração

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

BIG-GTCC – *Biomass Integrated Gasification Gas Turbine Combined Cycle*

BIG-CC – *Biomass Integrated Gasification Combined Cycle*

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

C0 – Cenário Convencional

C1 – Cenário com Reaquecimento

C2 – Cenário com Regeneração

C3 – Cenário com Reaquecimento e Regeneração

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas

FESR – *Fuel Economy Saving Rate*

G1 – Grupo I

G2 – Grupo II

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MME – Ministério de Minas e Energia

PCI – Poder calorífico inferior

PROÁLCOOL – Programa Nacional do Álcool

TCD – Toneladas de Cana per Dia

TTD – *Terminal Temperature Difference*

TV-C2E – Turbina De Condensação Com Duas Extrações

DCA – *Drain Cooler Approach*

UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar

# SUMÁRIO

|        |                                                                                    |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | INTRODUÇÃO .....                                                                   | 17 |
| 1.1.   | Objetivos .....                                                                    | 18 |
| 1.2.   | Justificativa .....                                                                | 18 |
| 1.3.   | Estrutura da dissertação .....                                                     | 20 |
| 2.     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                                         | 21 |
| 2.1.   | Aspectos gerais .....                                                              | 30 |
| 2.1.1. | Reaquecimento .....                                                                | 30 |
| 2.1.2. | Regeneração .....                                                                  | 31 |
| 2.1.3. | Indicadores de desempenho .....                                                    | 36 |
| 2.1.4. | Descrição do software GateCycle™ .....                                             | 37 |
| 3.     | SIMULAÇÃO DOS SISTEMAS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA.....                                | 38 |
| 3.1.   | Descrição dos sistemas simulados .....                                             | 38 |
| 3.1.1. | Parâmetros utilizados nas simulações .....                                         | 38 |
| 3.1.2. | Descrição do ciclo de cogeração convencional (C0) .....                            | 41 |
| 3.1.3. | Descrição do ciclo de cogeração com aquecimento (C1) .....                         | 41 |
| 3.1.4. | Descrição do ciclo de cogeração regenerativo (C2).....                             | 43 |
| 3.1.5. | Descrição do ciclo de cogeração com aquecimento e regeneração (C3) .               | 48 |
| 4.     | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES .....                                                    | 50 |
| 4.1.   | Ciclo com aquecimento (C1) .....                                                   | 50 |
| 4.1.1. | Determinação da pressão ótima de aquecimento .....                                 | 51 |
| 4.1.2. | Efeito da extração de vapor de processo sobre a pressão ótima de aquecimento ..... | 53 |
| 4.2.   | Ciclo regenerativo (C2) .....                                                      | 55 |
| 4.2.1. | Grupo I .....                                                                      | 55 |
| 4.2.2. | Grupo II.....                                                                      | 58 |
| 4.3.   | Ciclo com aquecimento e regeneração simultâneo (C3). .....                         | 63 |
| 4.4.   | Comparação dos cenários avaliados .....                                            | 67 |
| 4.4.1. | Bagaço Excedente no Grupo I .....                                                  | 67 |
| 4.4.2. | Eficiência Exergética no Grupo I.....                                              | 68 |
| 4.4.3. | Bagaço Excedente no Grupo II .....                                                 | 69 |
| 4.4.4. | Eficiência Exergética no Grupo II .....                                            | 70 |
| 4.5.   | Energia Elétrica Excedente Adicional durante a entressafra .....                   | 71 |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.6. Potencial de incremento na produção de etanol pela adição de uma planta de 2ª geração | 74  |
| 5. ANÁLISE EXERGÉTICA.....                                                                 | 77  |
| 5.1. Exergia .....                                                                         | 77  |
| 5.1.1. Exergia destruída.....                                                              | 77  |
| 5.2. Resultados da análise exergética.....                                                 | 79  |
| 5.2.1. Ciclo de cogeração convencional (C0) .....                                          | 80  |
| 5.2.2. Ciclo de cogeração com reaquecimento (C1) .....                                     | 81  |
| 5.2.3. Ciclo de cogeração regenerativo (C2).....                                           | 82  |
| 5.2.4. Ciclo de cogeração com reaquecimento e regeneração (C3) .....                       | 90  |
| 5.3. Eficiência exergética da Caldeira .....                                               | 101 |
| 6. CONCLUSÕES.....                                                                         | 104 |
| 6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                                | 105 |
| 7. REFERÊNCIAS .....                                                                       | 106 |
| ANEXOS .....                                                                               | 112 |
| Anexo AI – Esquemas dos cenários de cogeração .....                                        | 113 |
| Anexo AII - Tabelas de propriedades.....                                                   | 131 |
| Anexo AIII - Tabelas de balanços exergéticos nos sistemas de cogeração.....                | 149 |



# 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos cresceu o interesse pelo aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética ao redor do mundo. Isto devido à instabilidade do preço do petróleo, as perspectivas de declínio em suas reservas, o impacto ambiental das fontes de petróleo gerado no ambiente e especialmente o impacto destes sobre a mudança climática. O que fez com que o uso de fontes de energia mais limpas se tornasse um tema de discussão em todo o mundo.

Atualmente a biomassa representa 8,9% da capacidade instalada na Matriz de Energia Elétrica do Brasil, e o bagaço de cana-de-açúcar tem a maior participação neste tipo de fonte (ANEEL, 2016). O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia, China e Tailândia (MAPA, 2015). É responsável por mais da metade do açúcar comercializado no mundo, e deve alcançar taxa média de aumento da produção de 3,25%, até 2018/19 (BRASIL, 2016).

O etanol produzido a partir da cana-de-açúcar também conta com projeções positivas para os próximos anos devido, principalmente, ao crescimento do consumo interno. A expansão do setor automobilístico e o uso crescente dos carros *flex* (bicombustíveis) são os principais fatores de crescimento na produção de etanol no Brasil. O consumo interno está projetado em 50 bilhões de litros e as exportações em 8,8 bilhões (BRASIL, 2016).

Com este panorama é evidente a importância da biomassa da cana-de-açúcar na produção de energia no Brasil, não só pelo etanol como combustível em veículos a motor, mas também com o uso do bagaço como combustível principal nos sistemas de cogeração. A eletricidade e calor gerados a partir deste subproduto nas usinas sucroalcooleiras são capazes de atender as demandas próprias das usinas, e os excedentes geralmente são vendidos e distribuídos na rede, contribuindo efetivamente para a matriz energética nacional.

Neste sentido diversos trabalhos têm surgido: análises de ciclos Rankine tradicionais com vapor de alta pressão e alta temperatura (80bar@510°C) com turbinas de vapor de contrapressão e condensação (FIOMARI, 2004, ROMÃO JÚNIOR, 2009, DIAS *et al.*, 2010, DESHMUKH *et al.*, 2013, DOS SANTOS, 2014); ciclos combinados com integração de sistemas de gaseificação de biomassa para produção de gás combustível ou BIG-CC (*Biomass Integrated Gasification Combined Cycle*) (DIAS *et al.*, 2010, DESHMUKH *et al.*, 2013, CORRÊA NETO, 2001, WALTER, A.e LLAGOSTERA, 2007, SEABRA e MACEDO, 2010); desenvolvimento de ferramentas para visualização e análises *Pinch* dos principais pontos de irreversibilidades

nos sistemas (DIAS *et al.*, 2010, HIGA, 2003, RAGHU RAM e BANERJEE, 2003); entre outros estudos, a maioria deles com objetivo de aumentar a geração de eletricidade.

No entanto, existe escassa bibliografia que evidencie o emprego de opções de melhorias baseadas em sistemas de reaquecimento e regeneração especificamente em sistemas de cogeração em usinas de açúcar e álcool, o que torna este, um tema interessante de estudo.

No presente trabalho pretende-se avaliar em termos termodinâmicos, cenários voltados à melhoria do desempenho global em unidades de cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro brasileiro, baseados na incorporação de sistemas de reaquecimento e regeneração.

## **1.1. Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma avaliação termodinâmica da incorporação de reaquecimento e regeneração nos sistemas de cogeração do setor sucroalcooleiro brasileiro, como forma de aumentar a produção de bagaço excedente.

Entre os objetivos específicos estão:

- a) Definir um caso base do sistema de cogeração baseado na revisão bibliográfica do estado atual dos sistemas de cogeração no setor sucroalcooleiro brasileiro;
- b) Definir diferentes configurações no sistema de cogeração incorporando os sistemas de reaquecimento e regeneração;
- c) Definir indicadores de desempenho baseados na primeira e segunda lei da termodinâmica para avaliar os cenários considerados;
- d) Avaliar exergeticamente as diferentes alternativas consideradas.

## **1.2. Justificativa**

Uma característica importante do setor sucroalcooleiro brasileiro é a sua auto-suficiência energética, uma vez que são capazes de produzir toda a demanda de potência (elétrica e mecânica) e calor (vapor) para a produção de álcool e açúcar, a partir do aproveitamento da biomassa residual (bagaço) como único combustível.

Nas usinas de açúcar e álcool, 70% da energia consumida é na forma térmica (vapor de baixa pressão) para seus processos produtivos e o 30% restantes, na forma de potência (PERLINGEIRO, 2014).

Inicialmente a cana-de-açúcar que entra na planta passa para um processo de limpeza que pode ser úmida ou seca para a remoção de impurezas provenientes do campo, e posteriormente é preparada para a extração do seu caldo nas moendas. O acionamento dos sistemas de preparo e extração é realizado pela potência de eixo gerada por turbinas a vapor (de simples ou múltiplos estágios) ou por motores elétricos.

Nos turbogeradores, a energia mecânica transforma-se em energia elétrica que é utilizada em motores elétricos para o acionamento de bombas, ventiladores, exaustores, transportadores, centrífugas, iluminação, etc. O vapor de alta pressão, é expandido nas turbinas até uma pressão aproximada de 150-250 kPa para ser utilizado nos diferentes processos de produção de açúcar e álcool (tratamento do caldo, evaporação, destilação, cozimento, etc.) (PERLINGEIRO, 2014).

Atualmente, o bagaço obtido na produção de açúcar ou álcool é destinado basicamente à geração de energia, nas formas térmica, mecânica e elétrica, sendo a energia obtida pela queima deste resíduo nas caldeiras suficiente para suprir toda a demanda das unidades produtoras e ainda gerar excedentes exportáveis à rede elétrica. Além da utilização como fonte primária de energia na indústria do etanol, o bagaço da cana tem outras aplicações.

Recentemente, a utilização do bagaço em outros setores industriais tem apresentado um crescimento considerável, como no caso da indústria da polpa e papel, onde pode ser utilizado como matéria-prima principal. Outras aplicações estão na fabricação de plásticos industriais e tintas e também na produção de etanol lignocelulósico. No ano de 2014 foi inaugurada a primeira planta de biocombustível de segunda geração no Estado de Alagoas (GRANBIO, 2015).

Surge então, a necessidade de implementar ações de melhorias nas usinas sucroalcooleiras, que sejam focalizadas no incremento da eficiência global da planta (Sistema de cogeração-processo) a fim de aumentar a disponibilidade de bagaço excedente.

Neste sentido, o reaquecimento e a regeneração aparecem como alternativas que permitem obter melhorias no desempenho do ciclo de cogeração e o potencial de economia de bagaço será objeto de estudo neste trabalho.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

A revisão bibliográfica sobre o setor sucroalcooleiro brasileiro, aspectos gerais sobre o reaquecimento e regeneração, indicadores de desempenho baseados na Primeira e na Segunda Leis da termodinâmica e a descrição das ferramentas computacionais a utilizar neste estudo, são apresentados no Capítulo 2.

No Capítulo 3 é apresentada a descrição dos sistemas de cogeração: principais parâmetros de operação, a descrição do ciclo de cogeração convencional, com reaquecimento, com regeneração e com reaquecimento e regeneração.

Os resultados das simulações de cada cenário considerado são apresentados no Capítulo 4, em quanto que os resultados da análise exergética são apresentados no Capítulo 5.

As conclusões são apresentadas no Capítulo 6.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão apresentadas resumidamente algumas publicações que servirão como referência para o desenvolvimento do presente trabalho.

Carrocci e James (1991) analisaram duas centrais de cogeração para a produção de álcool no Brasil. Cada um dos sistemas foi testado na base do conhecimento disponível sobre a eficiência da produção de álcool e de conteúdo de energia específica de fibras residuais e resíduos de destilação. Encontraram benefícios significativos a partir do uso da cogeração, conseguindo aumentar até 15% de eficiência global.

Walter (1994) tratou da cogeração e da produção independente de eletricidade como formas de geração descentralizada de energia elétrica, em especial, da viabilidade e das perspectivas dessas tecnologias junto ao setor sucroalcooleiro no Brasil. Identificou suas principais características e as razões pelas quais essas alternativas têm sido tratadas e valorizadas no contexto internacional. Analisou a estrutura organizacional e a origem das crises institucional e financeira do setor elétrico, assim como algumas propostas de restauração. Analisou a expansão da agroindústria canavieira, com destaque para as questões relativas à concentração da produção, custos, e opções de diversificação da produção de álcool etílico. Considerou várias alternativas de geração elétrica em larga escala, determinando as principais características técnicas de cada sistema, tais como a capacidade de geração, a produção de energia elétrica, a disponibilidade de excedentes e os requerimentos de biomassa. O potencial das tecnologias de maior viabilidade técnica e econômica foi calculado para o Estado de São Paulo, a partir da consideração de cenários de crescimento da produção da cana, identificando as usinas mais adequadas para esses empreendimentos.

Barreda del Campo (1995) avaliou três configurações de sistemas de cogeração em usinas de açúcar, visando à produção de excedentes de energia elétrica a ser comercializado. Estudou a influência dos parâmetros do vapor, a eficiência das caldeiras, e para as configurações de melhor desempenho, a dependência da geração de eletricidade em função da demanda de vapor do processo. Uma análise exérgica das alternativas mais significativas e uma análise econômica das opções mais promissoras foram também realizadas.

Carpio *et al.* (1999) analisaram dois esquemas de cogeração, um com turbina de contrapressão com parâmetros de vapor de 2,1 MPa e 300°C, e outro com turbina de condensação com extrações e com parâmetros do vapor de 8 MPa e 450°C, os dois casos para uma usina de 200 t/h de capacidade de moenda de cana-de-açúcar. Diferentes critérios

termodinâmicos para a determinação da eficiência de geração de eletricidade e calor foram aplicados, tais como o fator de utilização de energia, a eficiência térmica, a relação de economia de energia do combustível e a eficiência da cogeração. Analisaram também a possibilidade de utilização de combustível auxiliar para o período fora de safra empregando a palha da cana, o eucalipto e gás natural, considerando diferentes cenários de preços. Os autores concluíram que o sistema com turbina de condensação com duas extrações (TV-C2E) apresentou melhor desempenho além de ter uma taxa de economia da energia do combustível (*FESR — Fuel Economy Saving Rate*) muito maior. Das alternativas analisadas, o gás natural foi o combustível complementar com menor custo de geração seguido da palha, sendo o eucalipto inviável pelos custos associados.

Bhatt e Rajkumar (2001) apresentaram um mapeamento das faixas de operação de plantas combinadas de geração de calor e energia, abrangendo desde turbinas de contrapressão pura até turbinas de condensação. Mostraram as condições de vapor padrão neste tipo de instalações e as eficiências que foram atingidas experimentalmente. Destacaram possíveis melhorias nos sistemas através da utilização de modelos avançados de turbinas a vapor e introdução de tecnologias de informação associados à fiscalização, controle e aquisição de dados, sistema de gestão de energia e a interação multimídia.

Corrêa Neto (2001) avaliou a viabilidade técnica e econômica de projetos de geração de energia elétrica utilizando como combustível o bagaço de cana-de-açúcar, a palha e as pontas da planta como opção complementar na expansão do sistema elétrico brasileiro. A tecnologia analisada foi geração termelétrica com ciclo combinado operando em cogeração, integrado sistemas de gaseificação de biomassa para produção de gás combustível, com e sem adição de gás natural. Este tipo de tecnologia é conhecida pelas siglas *BIG-GTCC*, originada no inglês *Biomass Integrated Gasification Gas Turbine Combined Cycle*. A análise econômica foi feita através da modelagem e construção de curvas de economicidade do projeto, baseada nos preços da energia elétrica, gás natural e nos custos da biomassa.

Higa (2003) fez a revisão do método *Pinch* como ferramenta para visualização dos principais pontos de irreversibilidades de um sistema. Analisou uma usina de açúcar e álcool em particular, comparando diferentes alternativas de cogeração nessa planta, concluindo que quanto melhor for à integração térmica da mesma, melhores serão as condições para maximização da geração de potência excedente.

Sánchez Prieto (2003) realizou uma análise termoeconômica baseada na teoria do custo exergético do sistema de cogeração de uma usina de açúcar para a safra do ano 2000.

Determinou a eficiência da primeira lei da termodinâmica dos geradores de vapor da usina e o consumo de combustível concernente, seguidamente determinou a eficiência da primeira e segunda lei para os principais equipamentos da planta junto com alguns índices de desempenho típicos dos sistemas de cogeração. O objetivo principal do estudo foi determinar os custos dos principais fluxos do sistema, considerando os custos de instalação da planta de cogeração como se fosse um sistema novo, amortizado em 15 anos com uma taxa de juros de 15% ao ano.

Fiomari (2004) fez uma análise energética e exergética de cinco plantas de vapor na Destilaria Pioneiros, consideradas na expansão do sistema de cogeração da usina. A configuração inicialmente considerada foi constituída por caldeiras de baixa pressão, com turbinas de simples estágio para geração de eletricidade e com picador desfibrador e moendas de acionamento mecânico. A configuração final foi constituída por caldeiras de alta pressão, com turbina de extração-condensação e com substituição dos acionamentos mecânicos por elétricos nos outros equipamentos. Avaliou a eficiência na geração de calor e potência de cada componente pela primeira e segunda lei da termodinâmica, além dos cálculos de alguns indicadores comuns em usinas de açúcar e álcool, como consumo específico de vapor nas turbinas e consumo específico de vapor de processo. Realizou algumas análises de sensibilidade para avaliar o comportamento de aproveitamento global de energia de um ciclo com turbina de extração-condensação levando em consideração a variação de parâmetros como eficiência da caldeira, consumo de vapor de processo e taxa de condensação na turbina.

Uchôa (2005) analisou a possibilidade de usar o gás natural como combustível complementar em usinas de açúcar e álcool paulistas próximas do gasoduto, com a finalidade de aumentar a quantidade de energia e/ou bagaço para comercialização e permitir também a operação durante o ano todo. Foi realizado um estudo termodinâmico detalhado com uma criteriosa análise da viabilidade técnica e econômica, levando-se em conta as modificações que devem ser feitas nas plantas tradicionais incluindo queimadores de gás nas caldeiras e/ou instalação de uma turbina a gás e uma caldeira de recuperação. Os resultados mostraram que o gás natural queimado diretamente nas caldeiras passa a ser uma opção economicamente inviável, enquanto que seu uso em ciclo combinado resultou ser uma alternativa interessante.

Pellegrini et al. (2006) apresentaram um sistema de cogeração com utilização de bagaço de cana-de-açúcar e gás natural, visando maximizar a produção de eletricidade. Para esse sistema foram propostas diversas estratégias de operação para uma mesma planta de utilidades. A primeira delas foi a operação utilizando todo o bagaço na gaseificação e complementação de gás natural na turbina a gás, de forma a atender a demanda de vapor da usina (sem queima

adicional de bagaço na caldeira de recuperação) e a segunda foi a operação enviando uma determinada quantidade de bagaço ao gaseificador de forma a operar um determinado modelo de turbina e o excedente de bagaço é queimado na caldeira de recuperação de forma a maximizar a quantidade de vapor produzida e potencializar a produção de eletricidade no sistema a vapor. Concluíram que para se maximizar a potência elétrica do sistema é preciso comprometer o rendimento exergético do sistema, devido as grandes irreversibilidades que ocorrem na queima do bagaço na caldeira, no entanto, essa queima adicional potencializa a geração de vapor na caldeira de recuperação e, conseqüentemente, a potência elétrica gerada por este. Inferiu também que quanto maior a potência da turbina a ser utilizada, maior é a produção de eletricidade do conjunto, devido aos equipamentos de maior porte promoverem um rendimento exergético do sistema maior e, conseqüentemente, uma maior produção de eletricidade.

Ensinas *et al.* (2006) analisaram diferentes opções de sistemas de cogeração em usinas de cana, a fim de avaliar as possibilidades de aumentar a geração de eletricidade. A análise da usina foi realizada em conjunto com a redução da demanda de vapor para o processo de produção de açúcar uma vez que os dois sistemas estiverem interligados. No estudo foram consideradas quatro opções: A primeira foi uma configuração com uma turbina de vapor de contrapressão, este tipo de sistema de cogeração é o mais comum nas fábricas de cana-de-açúcar do Brasil. A segunda configuração foi um ciclo de Rankine com uma turbina de extração-condensação. Neste caso, o condensador oferece mais opções de operação e maior flexibilidade. A terceira configuração opera com um gaseificador que converte o bagaço produzido pela fábrica num gás de síntese que logo é usado como combustível numa turbina de gás. A energia térmica dos gases de exaustão da turbina a gás é utilizada na geração de vapor numa caldeira de recuperação. A quarta configuração foi um ciclo combinado integrado com a gaseificação de biomassa. Concluíram que existe um potencial para aumentar significativamente a produção de eletricidade a partir do bagaço de cana de açúcar e lixo como combustíveis, principalmente, com ciclos de vapor com turbinas de condensação e com a redução na demanda de vapor de processo.

Okure *et al.* (2006) propuseram a cogeração com um gaseificador integrado ao ciclo combinado a fim de produzir eletricidade excedente para os outros consumidores a uma taxa competitiva. Foram analisadas diferentes opções para aumentar a geração de eletricidade nas usinas de açúcar usando processos avançados para gerar vapor, tecnologias de ciclos combinados e bagaço como combustível. Com o ciclo proposto os autores mostraram a



possibilidade de alcançar uma geração de energia elétrica específica de 200 kWh/t de cana e indicaram um período de retorno de seis anos, tornando-se uma proposta interessante para o setor.

Ensinas, *et al.* (2007) analisaram a redução da demanda de vapor no processo de açúcar e etanol e alternativas para os sistemas de cogeração em usinas de cana-de-açúcar, visando aumentar a geração de eletricidade excedente. Estudaram dois casos, um com alta demanda de vapor de processo, com a intenção de representar o consumo de energia térmica de plantas típicas de açúcar e etanol no Brasil. E o segundo caso no qual foi implementado um procedimento de integração térmica, reduzindo a demanda de vapor. Diferentes alternativas de sistemas de cogeração foram simulados para ambos os casos, considerando os ciclos de vapor e ciclos baseados na gaseificação de biomassa. Concluíram que a demanda de vapor do processo para usinas de açúcar e etanol pode ser reduzida significativamente com o processo de integração térmica, para ciclos de vapor tradicionais com turbinas de contrapressão (primeiro caso), uma quantidade significativa de bagaço excedente pode ser obtida com a redução da demanda de vapor de processo, permitindo a sua utilização como matéria-prima para outros subprodutos das plantas de cana, como o etanol ou produtos químicos adicionais. Para aquelas plantas com reduzida demanda de vapor (segundo caso) conseguiram um aumento considerável na geração de eletricidade excedente junto com os ciclos de potência baseado em gaseificação de biomassa.

Walter e Llagostera (2007) analisaram a viabilidade de ciclos combinados com *co-firing* (gás + gás natural derivado de biomassa) com base na gaseificação de resíduos de cana-de-açúcar (bagaço e palha). A análise foi baseada em custos de capital e custos de operação e manutenção estimados, tendo em conta os custos atuais e de médio prazo da tecnologia *BIG-CC*. Concluíram que uma significativa redução nos custos de investimentos nas tecnologias de gaseificação faz com que a tecnologia *BIG-CC* seja uma alternativa competitiva no mercado.

Seabra (2008) investigou o aproveitamento do bagaço de cana considerando quatro tipos de tecnologias: geração de energia elétrica com ciclos a vapor (opção atualmente comercial); produção de etanol através de hidrólise (opções para curto, médio e longo prazo); geração de energia elétrica a partir da gasificação da biomassa integrada a ciclos combinados (*BIG-GTCC*) (opções para médio-longo prazo) e a produção de combustíveis de síntese a partir da gasificação da biomassa (opções para médio-longo prazo). Foram discutidos os aspectos tecnológicos mais importantes em cada caso e estimados, também, os rendimentos e custos de sistemas integrados

a uma usina de cana. Evidenciou-se um benefício significativo do uso dos açúcares da cana para produção de produtos de maior valor agregado.

Ensinas *et al.* (2008) avaliaram mediante uma análise exergética, uma usina sucroalcooleira e seu sistema de cogeração. Dividiram a planta em oito subsistemas e avaliaram a irreversibilidade em cada uma separadamente. No processo de simulação foram utilizados dados de usinas típicas do Brasil que produz açúcar e etanol. Na simulação encontraram que as maiores contribuições para geração de irreversibilidade foram a extração de suco e fermentação. Foram propostas e analisadas melhoras nesses subsistemas, indicando que assim pode-se reduzir as irreversibilidades em 10%.

Kamate e Gangavati (2008) apresentaram a análise exergética de uma planta de cogeração típica de 2500 TCD (toneladas de cana per dia) no setor sucroalcooleiro. Nessa análise exergética, além de outros métodos convencionais de análise, foi avaliada a eficiência e as perdas em cada componente. A análise foi desenvolvida para uma ampla gama de condições de entrada de vapor em torno dos valores comuns no setor. Os resultados mostraram que as condições de entrada de vapor ótimas foram 61 bar e 475°C, com uma turbina de contrapressão as eficiências energética e exergética foram 0,863 e 0,307 respectivamente e com turbina de condensação 0,682 e 0,260 respectivamente. O componente menos eficiente foi a caldeira e o mais eficiente a turbina.

Bocci *et al.* (2009) investigaram a partir de dados reais de uma usina de cana-de-açúcar a eficiência energética da planta. Além disso, exploraram as melhorias possíveis elevando a temperatura e pressão nos ciclos Rankine e algumas configurações inovadoras baseadas no gaseificador com turbinas a gás. O estudo mostrou que a configurações de usinas de energia propostas, aumentaram o potencial de cogeração com bagaço, incrementando significativamente a eletricidade renovável produzida, com a redução das emissões de  $CO_2$ .

Dantas Filho (2009) analisou os custos do processo de geração de energia a partir de biomassa, especificamente na cogeração com bagaço de cana-de-açúcar. Os dados foram coletados de quatro usinas que utilizam o bagaço de cana-de-açúcar como combustível para geração elétrica, cujos excedentes fossem vendidos para concessionária local. Os resultados do trabalho mostraram que este tipo de geração tornou-se técnica e economicamente viável e atrativa para as usinas do setor.

Romão Júnior (2009) analisou a utilização de palha como combustível suplementar para caldeiras convencionais de alta pressão (para bagaço), com a finalidade de gerar energia

excedente como possibilidade de ser exportada para comercialização. Realizou estudos de perdas, ganhos e investimentos, através de uma análise termodinâmica para produção de energia, produção de álcool e açúcar, e avaliou a eficiência dos equipamentos. Concluíram que a quantidade de energia excedente é representativa devido ao poder calorífico da palha ser maior que o de bagaço.

Pellegrini *et al.* (2009) apresentaram um estudo termoeconômico comparativo entre uma planta convencional operando com uma caldeira de vapor de média pressão 21 bar e 300 °C, com turbina de contrapressão e outra planta operando com um gaseificador integrado num ciclo combinado. Foram considerados diferentes consumos de vapor no processo com o objetivo de obter uma melhor integração na configuração. Os autores indicam que a gaseificação da biomassa integrada num ciclo combinado pode ser uma alternativa atrativa para as centrais de cogeração nas usinas de cana.

Dias *et al.* (2010) simularam uma destilaria autônoma, utilizando conceitos de Análise *Pinch* para otimizar a demanda útil. Foram estudados diferentes sistemas de cogeração: um Ciclo Rankine tradicional, com vapor de alta pressão e alta temperatura (80 bar, 510 °C) com turbinas de vapor de contrapressão e condensação; e um sistema *BIG-CC*, composto por uma turbina a gás operando com um gaseificador de biomassa que usa como matéria-prima o bagaço de cana. O principal objetivo do estudo foi mostrar o impacto no processo original e poder desenvolver melhorias em sistemas industriais.

Pellegrini e De Oliveira Junior (2010) apresentaram uma abordagem para o problema de otimização exergética de sistemas de cogeração em usinas sucroalcooleiras. Foi realizada uma análise exergética de um modelo geral para os processos de produção de açúcar e etanol com base em dados fornecidos por uma planta real, além disso, foi feita uma discussão sobre as variáveis que afetam o desempenho dos processos. Apresentaram um procedimento para avaliar modificações no sistema de cogeração e no processo, também apresentaram o impacto sobre os custos de produção de açúcar, etanol e eletricidade. Concluíram que a geração de excesso de eletricidade melhora o desempenho exergo-ambiental da fábrica como um todo.

Rocha (2010) realizou análises termodinâmicas e termoeconômicas aplicadas a uma usina de açúcar e álcool com processo de extração por difusão. Foram consideradas quatro situações: a configuração inicial da planta ou caso 1, onde é gerada energia elétrica só para consumo próprio e vapor para o processo de produção de álcool. Caso 2, onde o intuito é produzir o máximo de energia elétrica que o turbogerador pode fornecer e vapor para a produção de álcool e açúcar. No caso 3 foi adicionada uma turbina de condensação visando um melhor

aproveitamento para a geração de energia elétrica. Na última configuração, definida como caso 4, foi adicionada uma nova turbina de extração condensação e uma caldeira de alta pressão onde a prioridade foi a geração de energia elétrica. A análise realizada permitiu verificar os rendimentos das plantas estudadas e as eficiências dos principais equipamentos envolvidos, concluindo que o caso 4 foi à configuração mais propícia para exportação de energia elétrica, embora ela não apresentasse a melhor eficiência global. O caso 3 que resultou em uma maior eficiência global devido ao maior rendimento da caldeira de alta pressão.

Seabra e Macedo (2010) realizaram a comparação técnica, econômica e ambiental da geração de energia e produção de etanol a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar, levando-se em conta a instalação de uma unidade de conversão adjacente da usina em estudo. Os desempenhos do sistema foram simulados para uma instalação projetada para co-fermentação sacarificação enzimática (opção de etanol) e para uma usina comercial Rankine (opção de energia elétrica). Para a opção de etanol a produção total foi 124 l/t de cana com um excedente de energia de 50 kWh/t de cana e para a opção de eletricidade o etanol obtido foi 91 l/t de cana e a exportação de energia foi 130 kWh/t de cana.

Coleta e Martins (2012) apresentaram melhoras técnicas ao ciclo de vapor convencional utilizado nas usinas sucroalcooleiras brasileiras e avaliaram o desempenho de cada uma delas. As melhoras técnicas realizadas foram três; aumento das condições de operação do ciclo (pressão e temperatura) de 67 bar/480°C passaram para 100 bar/520°C; utilização de regeneração e reaquecimento. Oito cenários foram contemplados, quatro na condição 67bar/480°C e quatro a 100bar/520°C. Em cada subgrupo um cenário foi convencional, um com regeneração, outro com reaquecimento e o cenário final com acoplamento destes dois conceitos. Realizaram uma análise ambiental comparativa através da Análise de Ciclo de Vida (ACV), compararam o modelo de melhor desempenho (cenário final a 100 bar e 520°C) com a matriz elétrica nacional. Os resultados mostraram-se favoráveis nas modificações propostas.

Cremonez (2013) trabalhou em diferentes simulações de uma planta sucroalcooleira em expansão, considerando variações na moagem (1.500.000 até 1.800.000 toneladas de cana por safra) e variações no mix de produção (de 40% a 80%) mantendo-se a potência gerada em 39,3MW e 45MW respectivamente. Realizou uma detalhada análise termodinâmica, termoeconômica e econômica, incluindo a verificação da viabilidade e atratividade da ampliação da planta. A produção de excedentes foi quantificada em termos da primeira lei, a qualidade foi quantificada em termos da segunda lei e finalmente a viabilidade econômica foi avaliada com o uso dos métodos: valor presente, taxa interna de retorno e *payback*. Nos

resultados mostrou-se benefícios tanto para produção de açúcar e etanol como a possibilidade de ganho na comercialização de energia excedente devido ao grande potencial para a produção de eletricidade.

Dantas *et al.* (2013) analisaram as configurações técnicas mais promissoras para a produção de bioenergia a partir do bagaço de cana e assim estabeleceram qual seria a configuração de investimento mais atrativo para a indústria. Os dados apresentados não foram exclusivos da indústria brasileira, devido à falta de dados experimentais, uma vez que a grande maioria de novas tecnologias ainda não estão disponível comercialmente no Brasil. As análises foram projetadas a longo prazo (2030), encontrando-se cenários onde a alternativa de bagaço fornece o máximo de benefícios para gerar eletricidade.

Deshmukh *et al.* (2013) compararam diferentes cenários de cogeração para a produção eficiente de energia a partir de bagaço, numa fábrica de açúcar e etanol da Indonésia. Utilizaram dois sistemas de cogeração avançado: um deles incluiu um ciclo de vapor Rankine avançado (*ASRC*) de alta pressão (80 bar) de combustão direta, enquanto outro utilizou um gaseificador de biomassa integrado a um ciclo combinado (*BIGCC*). Os potenciais máximos de geração de eletricidade para cada sistema foram 170 kWh/tc (*BIG-CC*) e 140 kWh/tc (*ASRC*). Entretanto, o sistema *BIG-CC* precisa de uma taxa de alimentação de bagaço 50% maior do que necessita o sistema *ASRC*, para satisfazer a demanda de vapor de baixa pressão da fábrica, o que pode afetar sua capacidade para fornecer vapor e eletricidade fora de safra.

Dos Santos (2014) realizou análises termodinâmicas, termoeconômicas e econômicas de quatro cenários para uma usina do setor sucroalcooleiro. O primeiro caso analisado considera só a geração de eletricidade para consumo próprio. No segundo a planta consome a mesma quantidade de bagaço e opera com uma turbina de média pressão, gerando 2MW excedentes. No terceiro caso considerou-se que todo o bagaço produzido é consumido durante o período de safra para geração de energia elétrica. A usina opera com uma caldeira de alta pressão e uma turbina de extração-condensação, obtendo 29 MW de excedente. E no quarto caso considerou-se uma caldeira de alta pressão, uma turbina de extração-condensação e uma de contrapressão para geração de energia elétrica, gerando aproximadamente 35,2 MW excedente.

## 2.1. Aspectos gerais

### 2.1.1. Reaquecimento

O funcionamento do reaquecimento é ilustrado na Figura 2.1. Após a expansão na seção de alta pressão da turbina o vapor é trazido de volta para o gerador de vapor, no qual é reaquecido pelos gases da combustão, idealmente à temperatura máxima do ciclo. O vapor reaquecido (agora com maior temperatura e entalpia) continua a sua expansão na seção de baixa pressão da turbina até chegar ao condensador (BADR; PROBERT; O'CALLAGHAN, 1990).

As variáveis principais neste tipo de configuração são a pressão e temperatura de reaquecimento. O vapor vivo e o vapor de reaquecimento em usinas operadas com biomassa têm temperaturas típicas na faixa de 450 °C - 540 °C, dependendo da qualidade do combustível (IKAHEIMONEN *et al.*, 2013).

Os reaquecedores são essencialmente semelhantes ao superaquecedores, mas eles diferem nas pressões de operação. Para combustíveis fósseis o vapor que circula pelo superaquecedor na caldeira pode ter uma pressão de até 2.470 psig (170 bar), enquanto que a pressão de operação para reaquecedores é menor, cerca de 580 psig (40 bar) (IKAHEIMONEN *et al.*, 2013). Para cada conjunto de condições (pressão e temperatura) de vapor, existe uma pressão de reaquecimento ideal, atingindo a máxima eficiência do ciclo.

Usinas de grande porte (150 MW em diante) alimentadas geralmente com combustíveis fósseis, levam sistemas de reaquecimento dentro das suas configurações. Existem algumas poucas com capacidade cerca de 20 MW, que operam com biomassa e utilizam de igual modo o reaquecimento dentro das suas configurações (IKAHEIMONEN *et al.*, 2013), (BADR; PROBERT; O'CALLAGHAN, 1990).

O reaquecimento pode resultar em uma melhoria na eficiência do ciclo por causa do aumento da temperatura média termodinâmica na qual é adicionado o calor. No entanto, a vantagem mais significativa do uso de reaquecimento é que o vapor é mais seco na saída da turbina, quando os parâmetros de operação são elevados; o que evita o desgaste acelerado da paletas da turbina causado pela erosão. Quando a temperatura e pressão do vapor são aumentadas em procura de melhores eficiências, é recomendável usar o reaquecimento para evitar a elevada humidade na saída da turbina de condensação (BADR; PROBERT; O'CALLAGHAN, 1990) e (CERUTTI PANOSSO, 2003).

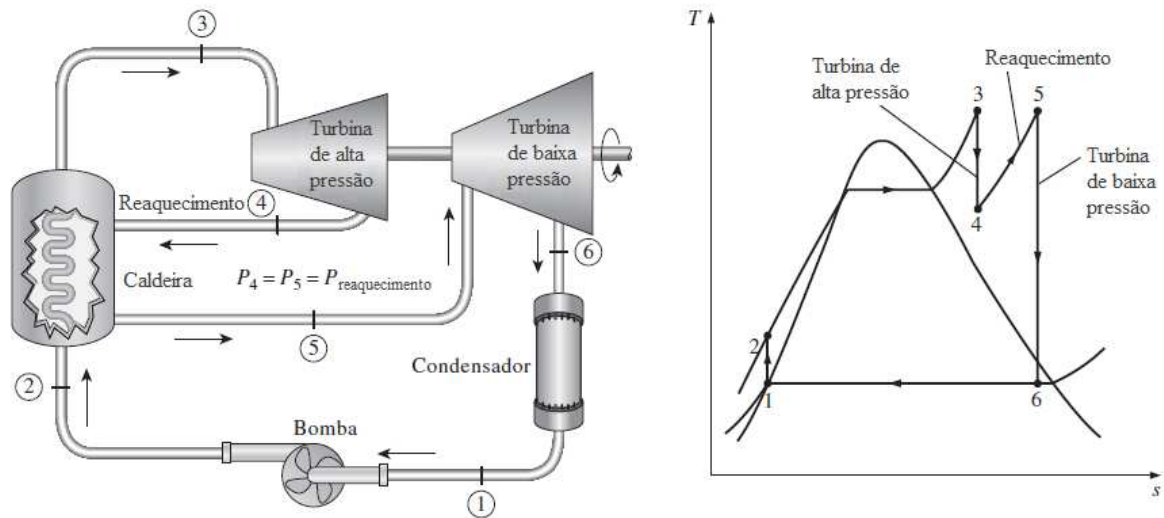


Figura 2.1 – Diagrama T-s para o ciclo Rankine com reaquecimento (CENGEL; BOLES, 2011)

A temperatura média termodinâmica pode ser aumentada durante o processo de reaquecimento através do aumento do número de fases de expansão e de reaquecimento. No entanto, o uso de mais do que duas fases, de reaquecimento não é prático. A melhoria da eficiência teórica devido ao segundo reaquecimento, está próxima da metade da melhoria devido a um único reaquecimento. Se a pressão de entrada da turbina não for suficientemente elevada, os resultados de duas fases de reaquecimento resultariam com escape sobreaquecido. Isto é indesejável porque faz com que a temperatura média de rejeição de calor seja aumentada, porém, a eficiência do ciclo seria diminuída. Portanto, o reaquecimento duplo só é usado em usinas com pressão supercrítica ( $P > 6,22 \text{ MPa}$ ). Uma terceira fase de reaquecimento aumentaria a eficiência do ciclo em quase metade da melhoria conseguida pelo segundo reaquecimento. Este ganho é tão pequeno que não justifica o custo e a complexidade adicional (CENGEL e BOLES, 2011).

### 2.1.2. Regeneração

Uma revisão cuidadosa do diagrama T-s do ciclo de Rankine ilustrada na Figura 2.2 indica que o calor é transferido para o fluido de trabalho durante o processo 2-2', a uma temperatura relativamente baixa. Esta condição reduz a temperatura média termodinâmica em que o calor é adicionado e, portanto, reduz a eficiência do ciclo.

Uma alternativa para melhorar a condição antes descrita consiste na utilização do processo de regeneração. O objetivo da regeneração é aumentar a temperatura do fluido de trabalho antes de alimentar a caldeira.

O processo de regeneração em usinas termelétricas é conseguido através da extração de vapor da turbina de extração-condensação. O vapor extraído poderia produzir mais trabalho ao se expandir ainda mais na turbina, em vez de aquecer a água de alimentação. O dispositivo onde a água de alimentação é aquecida por regeneração é chamado de regenerador ou aquecedor de água de alimentação (CENGEL e BOLES, 2011).

A regeneração não só melhora a eficiência do ciclo, também proporciona uma forma conveniente para ventilar a água de alimentação (eliminando os gases não condensáveis) para evitar a corrosão no ambiente da caldeira. Ela também ajuda a controlar o grande volume de fluxo de vapor na fase final da turbina (devido aos grandes volumes específicos a baixas pressões) (CENGEL e BOLES, 2011).

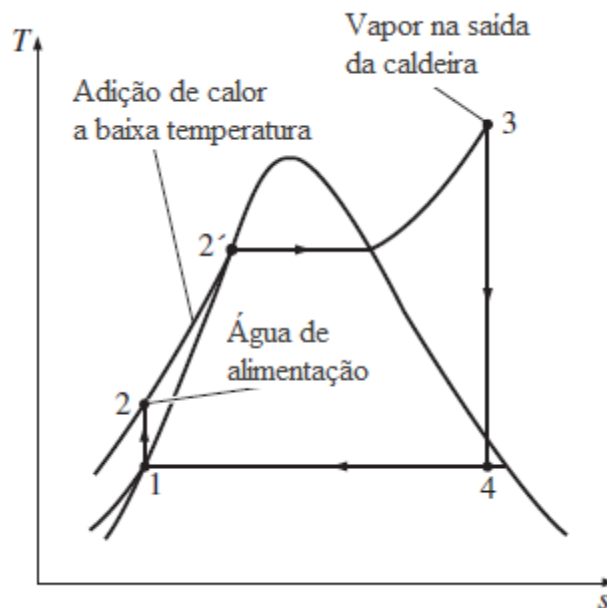


Figura 2.2 – Diagrama T-s do ciclo Rankine, processo de adição do calor

#### 2.1.2.1. Aquecedores da água da alimentação

Os aquecedores de água de alimentação podem ser de dois tipos: aquecedores abertos e aquecedores fechados.



Em um aquecedor aberto, chamado também de contato, o vapor extraído é misturado com a água de alimentação e ambos deixam o aquecedor a uma temperatura comum (NAG, 2008). O esquema da usina de vapor com um aquecedor da água de alimentação aberto (também chamado ciclo regenerativo de única etapa) e o respectivo diagrama T-s é mostrado na Figura 2.3.

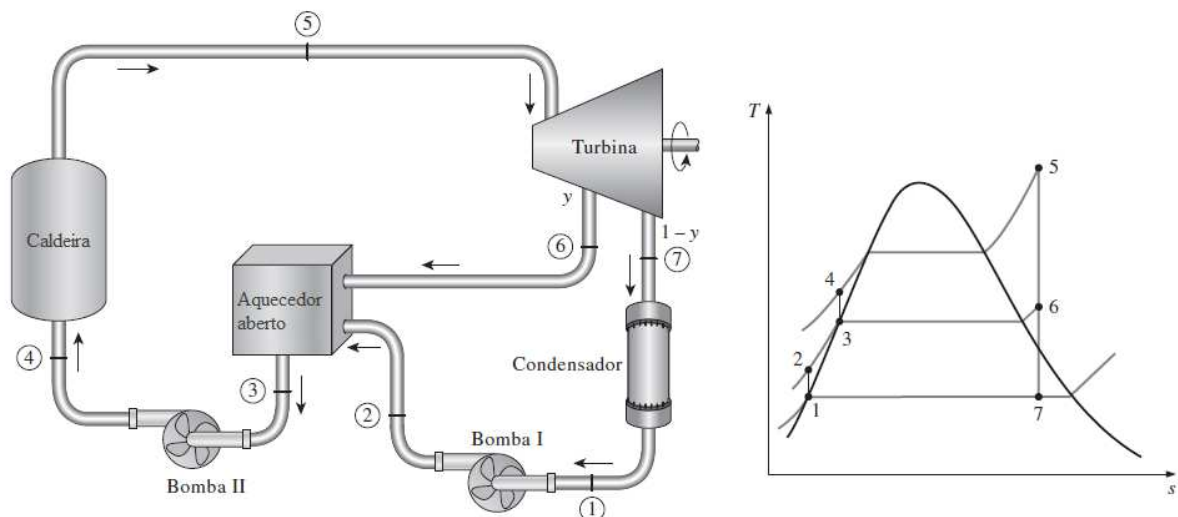


Figura 2.3 – Ciclo regenerativo com um aquecedor aberto (CENGEL; BOLES, 2011)

Em um aquecedor fechado, os fluidos são mantidos separados e não é permitido misturar-se. São trocadores de calor tipo carcaça-tubo nos quais a água de alimentação flui através dos tubos e o vapor extraído condensa fora dos tubos na carcaça. O calor liberado por condensação é transferido através das paredes dos tubos. O condensado (água saturada à pressão de extração de vapor), em seguida, passa por um coletor para o próximo aquecedor de baixa pressão, reduzindo assim o vapor necessário por esse aquecedor. Pelo coletor passa somente líquido. O dreno do último aquecedor (de pressão mais baixa) poderia igualmente passar para o condensador, mas isso seria desperdiçar energia para a água de refrigeração no condensador. Para evitar este desperdício, o dreno é bombeado diretamente para o fluxo de água de alimentação da caldeira. O esquema da usina de vapor com um aquecedor da água de alimentação fechado e o respectivo diagrama T-s é mostrado na Figura 2.4.

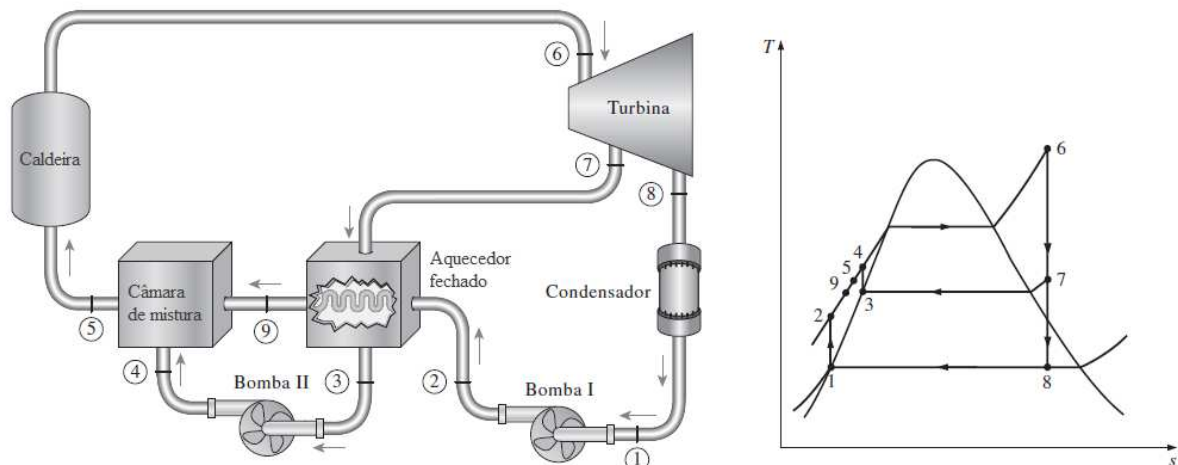


Figura 2.4 – Ciclo regenerativo com um aquecedor fechado (CENGEL; BOLES, 2011)

As vantagens do aquecedor aberto são: a simplicidade, baixo custo e a capacidade de transferência de calor elevado. A desvantagem é a necessidade de uma bomba a cada aquecedor para lidar com a grande corrente de água de alimentação.

Já os aquecedores fechados, como vantagem, requerem apenas uma única bomba para o fluxo principal da água de alimentação. A bomba de dreno, se utilizada, é relativamente pequena. Como desvantagens, são caros e não conseguem elevar tanto a temperatura da água de alimentação quanto os aquecedores abertos.

Na maioria das plantas termelétricas, os aquecedores mais utilizados são de tipo fechado e pelo menos um aquecedor aberto é usado, geralmente o aquecedor aberto é chamado de desaerador. Um desaerador é um dispositivo mecânico que elimina gases dissolvidos, tais como o dióxido de carbono e oxigênio, a partir da água de alimentação antes de chegar à uma caldeira de tubulação. A desaeração é feita para prevenir a corrosão, ajudando a reduzir a manutenção da planta e os custos operacionais.

#### 2.1.2.2. Grau ótimo de regeneração

A eficiência do ciclo é máxima quando o aumento total da entalpia da água de alimentação, a partir da temperatura do condensador até a temperatura de saturação na caldeira é dividida igualmente entre o número de regeneradores a serem utilizados.

Quanto maior o número de aquecedores, maior é a temperatura da água de alimentação entrando na caldeira, dessa forma, precisa-se de menos calor para adicioná-la, conseguindo aumentar a temperatura média de adição de calor, e em consequência aumentar a eficiência do ciclo.

O máximo de eficiência é alcançado quando os aquecedores de água de alimentação atingem a mesma diferença de temperatura dada pela diferença ótima calculada como:

$$\Delta T_{\text{ótimo}} = \frac{(T_{\text{sat}})_{\text{cald}} - (T_{\text{sat}})_{\text{cond}}}{n + 1} \quad (2.1)$$

Onde a  $(T_{\text{sat}})_{\text{cald}}$  e a  $(T_{\text{sat}})_{\text{cond}}$  são as temperaturas de saturação correspondentes à pressão de operação da caldeira e do condensador, respectivamente, e  $n$  é o número de regeneradores empregados.

O maior incremento da eficiência é originado pelo primeiro aquecedor, com cada aquecedor adicional os incrementos na eficiência do ciclo diminuem sucessivamente como é ilustrado na Figura 2.5 (NAG, 2008).

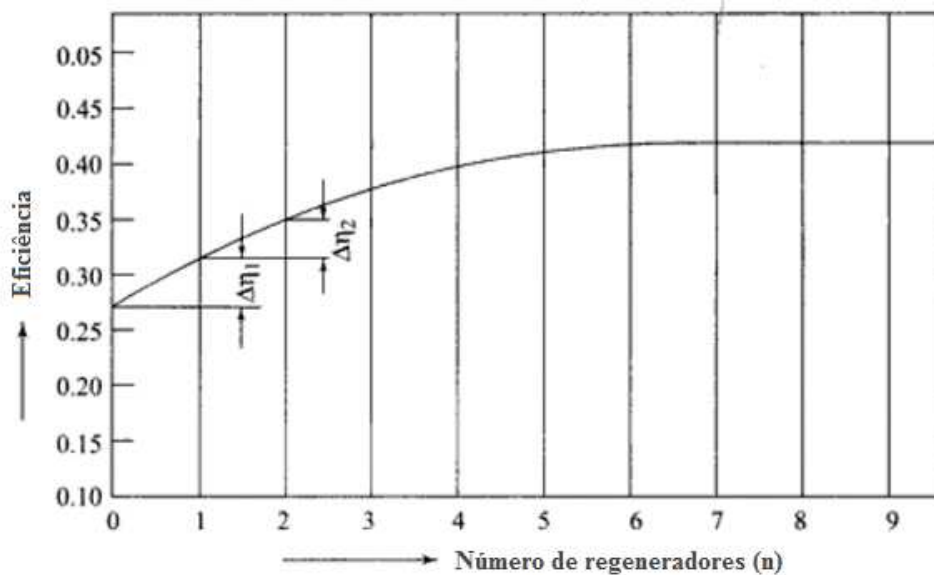


Figura 2.5 – Diminuição no ganho de eficiência conforme aumenta o número de aquecedores (NAG, 2008)

### 2.1.3. Indicadores de desempenho

Muitos são os benefícios da cogeração com relação à relativa alta eficiência em comparação com outros sistemas. Dado o fato que os sistemas de cogeração produzem eletricidade e energia térmica útil simultaneamente, a eficiência é quantificada e expressada de maneiras diferentes (DARROW *et al.*, 2015).

Os indicadores utilizados neste trabalho para medir o desempenho quando aplicado a sistemas de cogeração, são os seguintes:

**Bagaço excedente  $\beta_{exc}$  (%):**

$$\beta_{exc} = \frac{\beta_{disp} - \beta_{cons}}{\beta_{disp}} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Onde:

$\beta_{disp}$  representa a quantidade de bagaço disponível para utilização no sistema de cogeração em toneladas.

$\beta_{cons}$  representa a quantidade de bagaço consumido nas caldeiras em toneladas.

**Eficiência exergética  $\eta_{exe}$ :** é a soma das exergias dos produtos da planta de cogeração dividida pela exergia do combustível.

$$\eta_{exe} = \frac{B_P + B_Q}{B_F} \quad (2.3)$$

Onde:

$B_P$  é a exergia da eletricidade produzida (kW)

$B_Q$  é a exergia do calor produzido para processo (kW), e

$B_F$  a exergia do combustível (kW)

Para promover uma melhor comparação entre os resultados do sistema convencional, com reaquecimento, regenerativo e o sistema com reaquecimento e regeneração simultânea, é introduzida a variável:  $\Delta\eta_{exe}/\eta_{exe}$ , que representa o ganho relativo na eficiência exergética em relação ao ciclo convencional.

#### **2.1.4. Descrição do software GateCycle™**

Foi utilizado o software GateCycle nas simulações dos diferentes esquemas de cogeração consideradas neste trabalho. Esta ferramenta é usada para projetar e avaliar o desempenho de sistemas de conversão de energia, combinando uma interface gráfica para o usuário com modelos analíticos detalhados para simular processos que envolvem termodinâmica, transferência de calor e mecânica dos fluidos.

O software GateCycle™ calcula o desempenho da planta térmica no ponto de projeto e fora deste. Podem ser simuladas plantas de ciclo combinado, caldeira a combustível fóssil, centrais nucleares, sistemas de cogeração, ciclos avançados de turbina a gás e muitos outros sistemas de energia (GE, 2015).

O GateCycle™ possui a vantagem de ter uma interface gráfica do usuário com entrada de dados guiados e intuitivos, incluindo uma interface robusta para Microsoft Excel® chamada de CycleLink™ conseguindo trocar variáveis entre GateCycle™ e Excel® facilmente. Essa interface permite executar e controlar os cálculos a partir de uma planilha, e permite também a realização de análises paramétricas (usando o comando *Parametric Study*).

### 3. SIMULAÇÃO DOS SISTEMAS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA

#### 3.1. Descrição dos sistemas simulados

Nesta seção será realizada a descrição dos cenários a serem considerados, quais sejam: convencional (C0), com reaquecimento (C1), regenerativo (C2), e o final com reaquecimento e regeneração simultâneo (C3). A avaliação será dividida em dois grupos, com os mesmos parâmetros de operação, exceto a capacidade de geração de vapor. O Grupo I contempla um sistema de cogeração com capacidade de geração de vapor de 265 t/h e potência instalada de 50,4 MW, igual nos quatro cenários, e o Grupo II considera uma capacidade de geração de vapor de 281,5 t/h e potência instalada de 55,0 MW, igual nos quatro cenários.

A Tabela 3.1 resume as principais características dos sistemas de cogeração simulados.

Tabela 3.1 – Descrição geral dos sistemas simulados

| Sistema de cogeração |                                       | Capacidade de geração de vapor [t/h] | Potência instalada [MW] |
|----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Grupo I              | Convencional (C0)                     | 265,0                                | 50,4                    |
|                      | Com reaquecimento (C1)                |                                      |                         |
|                      | Com regeneração (C2)                  |                                      |                         |
|                      | Com reaquecimento e regeneração. (C3) |                                      |                         |
| Grupo II             | Convencional (C0)                     | 281,5                                | 55,0                    |
|                      | Com reaquecimento (C1)                |                                      |                         |
|                      | Com regeneração (C2)                  |                                      |                         |
|                      | Com reaquecimento e regeneração (C3)  |                                      |                         |

##### 3.1.1. Parâmetros utilizados nas simulações

Foi considerado como base para todas as simulações uma usina que processa 500 toneladas de cana por hora, resultando em uma vazão de bagaço de cana de 38,9 kg/s, com 50% de umidade (base úmida, b.u.). Considerando que 10% do bagaço gerado é estocado para

reinício de operações industriais, a vazão de bagaço disponível para utilização no gerador de vapor é de 35 kg/s.

O percentual de recolhimento da palha no período de safra a ser utilizado como combustível juntamente com o bagaço é de 10% (ALVES, 2011), sem ocasionar a necessidade de modificações em equipamentos industriais, especialmente na caldeira. Com esta percentual tense um fluxo de palha de 8,2 t/h ou 2,29 kg/s.

Um dos principais consumos de energia numa usina de açúcar e álcool é na forma de vapor. O consumo de vapor de processo é dado em função da tecnologia instalada em cada planta de produção e nas medidas de conservação de energia aplicadas na área industrial. Nas simulações desenvolvidas neste trabalho foi considerado um consumo de 450 kg de vapor por tonelada de cana processada, que pertence à faixa de valores típicos de usinas sucroalcooleiras (BNDES e CGEE, 2008). Para uma unidade de produção que processa 500 toneladas de cana por hora, resulta um consumo de vapor de processo de 62,5 kg/s.

A Tabela 3.2 descreve os fluxos de massa dos combustíveis (bagaço e palha de cana):

Tabela 3.2 – Fluxos de massa dos combustíveis

|                                     | [kg/t cana] | [t/h] | [kg/s] |
|-------------------------------------|-------------|-------|--------|
| Cana de açúcar                      |             | 500   | 138,9  |
| Bagaço de cana produzido (50% b.u.) | 280,0       | 140,0 | 38,9   |
| Bagaço de cana disponível           | 252,0       | 126,0 | 35,0   |
| Bagaço de cana estocado             | 28,0        | 14,0  | 3,9    |
| Palha de cana produzida (15% b.u.)  | 164,8       | 82,4  | 22,9   |
| Palha de cana disponível            | 16,5        | 8,2   | 2,3    |

Nas simulações foram consideradas caldeiras que geram vapor a pressão de 85 bar e temperatura de 520°C, configuração que tem sido usada recentemente em alguns projetos e que favorece o aumento da eficiência da produção de eletricidade (CGEE, 2009). Não foram consideradas perdas de vapor nas simulações.

O período de safra adotado foi de 180 dias efetivos de funcionamento, correspondendo a 4320 horas de operação, processando-se 2.289.600 toneladas de cana-de-açúcar. Esse valor é amplamente utilizado em estudos que tem relação com usinas sucroalcooleiras no Brasil

(SCHUCH PINTO, 2003, PELLEGRINI, M.; SOARES RAMOS e VIEIRA, 2003, SEABRA, J., 2008, COLETA e MARTINS, 2012).

A Tabela 3.3 descreve os parâmetros considerados em cada equipamento e etapa do processo, comuns a todos os cenários.

Tabela 3.3 – Principais parâmetros de operação

| Planta de cogeração                                                      |             |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Pressão do vapor na saída da caldeira <sup>1</sup>                       | 85 bar      |
| Temperatura do vapor <sup>1</sup>                                        | 520 °C      |
| Temperatura de reaquecimento <sup>2</sup>                                | 520 °C      |
| Pressão do condensação <sup>1</sup>                                      | 0,1 bar     |
| Umidade do bagaço <sup>3,4</sup>                                         | 50%         |
| Umidade da palha <sup>1,5</sup>                                          | 15%         |
| Conteúdo de fibras da cana-de-açúcar <sup>3</sup>                        | 14%         |
| PCI do bagaço <sup>1</sup>                                               | 7524 kJ/kg  |
| Exergia do bagaço <sup>6</sup>                                           | 9842 kJ/kg  |
| PCI da palha <sup>1</sup>                                                | 12960 kJ/kg |
| Exergia da palha <sup>7</sup>                                            | 15121 kJ/kg |
| PCI do bagaço + palha                                                    | 7857 kJ/kg  |
| Exergia do bagaço + palha                                                | 10166 kJ/kg |
| Taxa de recolhimento de palha <sup>8</sup>                               | 10%         |
| Eficiência térmica da caldeira <sup>1</sup>                              | 82%         |
| Eficiência isentrópica da turbina convencional<br>(extração/condensação) | 84%         |
| Eficiência isentrópica da turbina com reaquecimento                      | 84%         |
| Eficiência isentrópica das bombas <sup>1</sup>                           | 65%         |
| Eficiência do gerador elétrico                                           | 95%         |
| Biomassa para inicialização do sistema <sup>1</sup>                      | 5%          |
| Dias de operação da planta                                               | 180         |
| Moendas                                                                  |             |
| Capacidade de moagem                                                     | 500 t/h     |
| Demanda de potência dos acionadores elétricos das moendas <sup>1</sup>   | 16 kWh/t    |
| Demanda de vapor e eletricidade do processo                              |             |
| Consumo específico de eletricidade <sup>1</sup>                          | 18 kWh/t    |
| Consumo específico de vapor <sup>9,10</sup>                              | 450 kg/t    |
| Pressão do vapor do processo <sup>1</sup>                                | 2,5 bar     |

<sup>1</sup> Referência: (CGEE, 2009)

<sup>2</sup> Referência: (BADR; PROBERT; O'CALLAGHAN, 1990)

<sup>3</sup> Referência: (HUGOT, 1986)

<sup>4</sup> Referência: (CAMARGO *et al.*, 1990)

<sup>5</sup> Referência: (HASSUANI; REGIS; CARVALHO, 2005)

<sup>6</sup> Referência: (RENÓ, 2011)

<sup>7</sup> Referência: (PASSOLONGO, 2011)

<sup>8</sup> Referência: (ALVES, 2011)

<sup>9</sup> Referência: (BNDES; CGEE, 2008)

<sup>10</sup> Referência: (HASSUANI; REGIS; CARVALHO, 2005)



### 3.1.2. Descrição do ciclo de cogeração convencional (C0)

O cenário convencional ou base foi escolhido por ser o mais difundido na indústria açucareira brasileira, no que se refere a operação com altos parâmetros de vapor e maximização dos excedentes elétricos. Este sistema opera usando turbinas de extração condensação com parâmetros de vapor de 85bar@520°C, considerando a utilização de moendas eletrificadas para os processos de preparação da cana-de-açúcar e extração do caldo (FIOMARI, 2004), (MACEDO *et al.*, 2014). O ciclo de cogeração correspondente é apresentado na Figura 3.1.

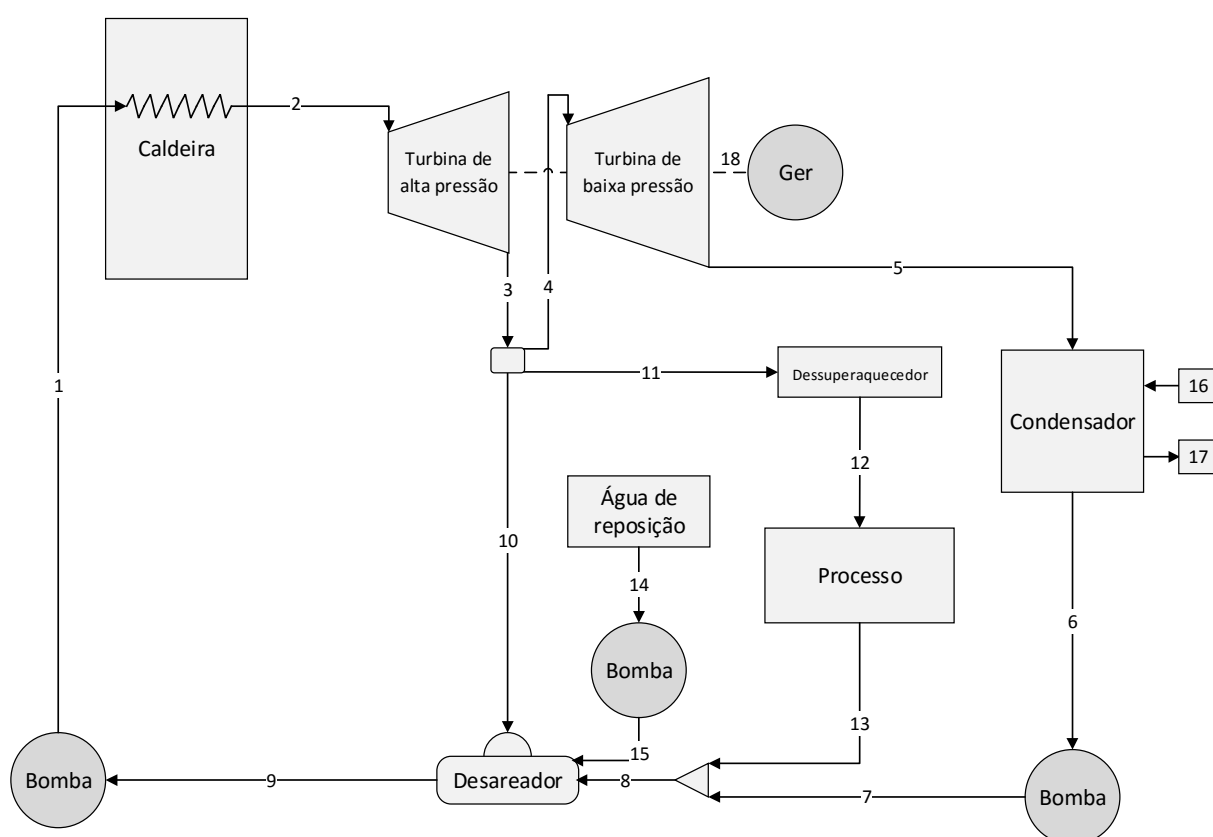


Figura 3.1 – Sistema de cogeração de uma usina sucroalcooleira convencional (C0)

### 3.1.3. Descrição do ciclo de cogeração com reaquecimento (C1)

A simulação para o ciclo Rankine em cogeração foi realizada com os mesmos parâmetros de operação do cenário convencional (C0), mas incorporando um estágio de reaquecimento. A Figura 3.2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o sistema de cogeração com uma etapa de reaquecimento considerada nas simulações desta seção.

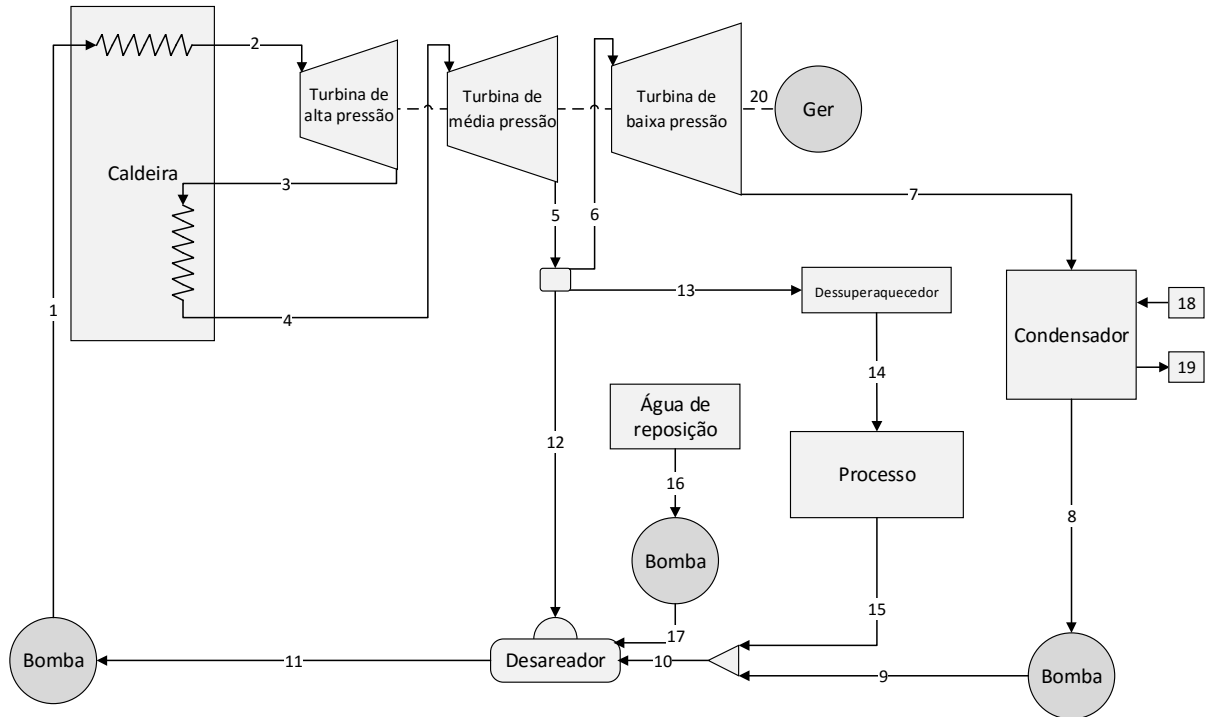


Figura 3.2 – Sistema de cogeração com um estágio de reaquecimento (C1)

A aplicação do reaquecimento como canal de melhoria se manifesta de duas maneiras: a primeira é pelo aumento da eficiência térmica e a segunda, mais significativa, pelo aumento do título na saída da turbina. Tal comportamento pode ser observado na Figura 3.3.

A temperatura de reaquecimento ideal é a mesma temperatura de saída de vapor da caldeira (BADR; PROBERT; O'CALLAGHAN, 1990). A temperatura de reaquecimento,  $T_r$ , adotada é igual a 520°C.

Badr *et al*, (1990) calcula o parâmetro adimensional ( $\overline{P}_R$ ) que maximiza a eficiência do ciclo considerando a pressão no condensador ( $P_C$ ) e ilustra o resultado na Figura 3.3. Neste trabalho a análise de sensibilidade inicia com a pressão de operação do desareador e não com a pressão do condensador. Porém, o parâmetro adimensional utilizado nas análises é baseado na relação entre a pressão de extração para reaquecimento ( $P_r$ ) e a pressão de geração da caldeira ( $P_b$ ), tal como é considerado em vários trabalhos (HABIB; SAID; AL-ZAHARNA, 1995), (DINCER; AL-MUSLIM, 2001), (ALEXE; CENUȘĂ; OPRIȘ, 2014)

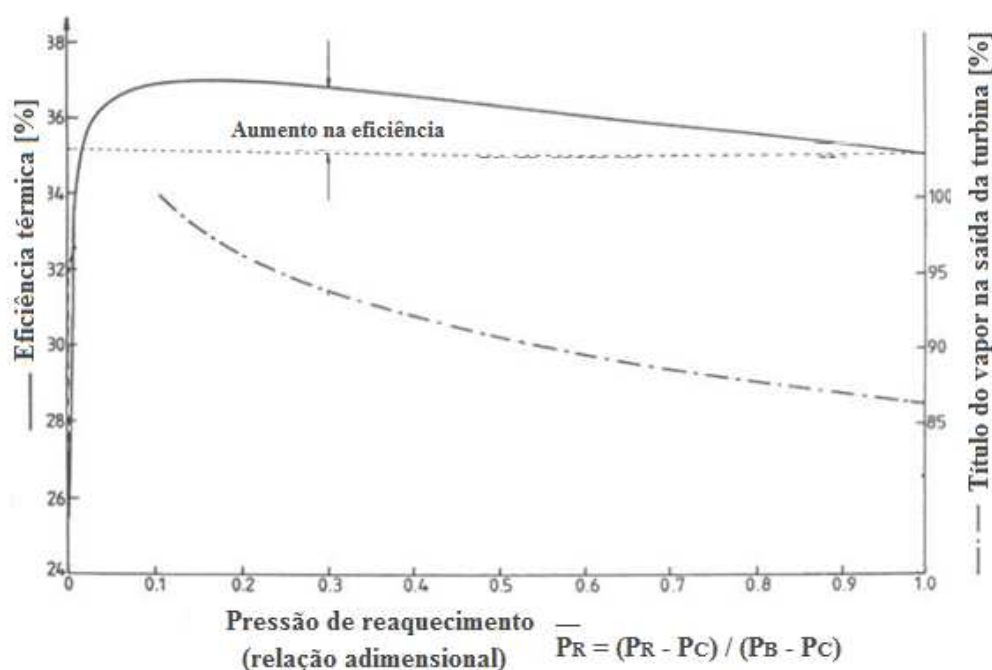


Figura 3.3 – Variações na eficiência térmica do ciclo e do título na saída da turbina de baixa pressão (Badr et al, 1990).

### 3.1.4. Descrição do ciclo de cogeração regenerativo (C2)

O sistema de cogeração regenerativo (Figura 3.4) caracteriza-se por incluir os dois tipos de regeneração mais utilizados em centrais termelétricas, de acordo com Badr, Probert e O'callaghan, (1990). Estes tipos de regeneração envolvem aquecedores de água de alimentação abertos ou de contato direto (*open feedwater*) e aquecedores do tipo fechado com dreno canalizado a montante (*drains cascaded backward*), este último foi escolhido por sua simplicidade e baixo custo em comparação aos aquecedores do tipo fechado com dreno bombeado a jusante (*drains pumped forwards*).

O desaerador é frequentemente empregado nas usinas de potência como aquecedor aberto e desempenha basicamente duas funções no ciclo: eliminar os gases não condensáveis e elevar a temperatura da água de alimentação da caldeira.

Os principais parâmetros utilizados para monitorar o desempenho de um regenerador são: a Diferencia de Temperatura Terminal (*TTD - Terminal Temperature Difference*); Diferença de Temperatura de Acesso do Dreno (*DCA - Drain Cooler Approach*) e o aumento da temperatura da água de alimentação.

Os aquecedores fechados com dreno canalizado a montante, podem ser saturados ou levemente sub-resfriados. A temperatura da água de alimentação na saída de um regenerador do tipo fechado não consegue alcançar a temperatura de entrada do vapor extraído da turbina. Assim existe uma *TTD* entre 4 e 6 °C, que depende das propriedades de projeto do regenerador (BADR; PROBERT; O'CALLAGHAN, 1990).

A *TTD* pode ser definida como a diferença entre a temperatura de entrada do vapor de extração para a condição de saturação e a temperatura de saída da água de alimentação, (BRASCHER, 1991). A *TTD* adotada neste trabalho foi de 4°C de acordo a recomendações propostas por Badr, Probert e O'callaghan, (1990).

Um outro parâmetro importante é a *DCA*. A *DCA* será necessária somente para o trocador fechado com resfriador de dreno e vem a ser a diferença de temperatura entre a condição de entrada do fluido quente e a de entrada do fluido frio (BRASCHER, 1991). O valor adotado para o *DCA* foi 5°C (SURESH; REDDY; KOLAR, 2010).

Os trocadores foram posicionados ao longo do ciclo segundo o critério de Badr, Probert e O'callaghan, (1990), sendo essa uma metodologia de seleção amplamente usada na prática.

O máximo de eficiência é alcançado quando os aquecedores de água de alimentação atingem a mesma diferença de temperatura calculada como:

$$\Delta T = \frac{(T_{sat})_{cald} - (T_{sat})_{cond}}{n + 1} \quad (3.1)$$

Onde a  $(T_{sat})_{cald}$  e a  $(T_{sat})_{cond}$  são as temperaturas de saturação correspondentes à pressão de operação da caldeira e do condensador, respectivamente, e  $n$  é o número de regeneradores empregados.

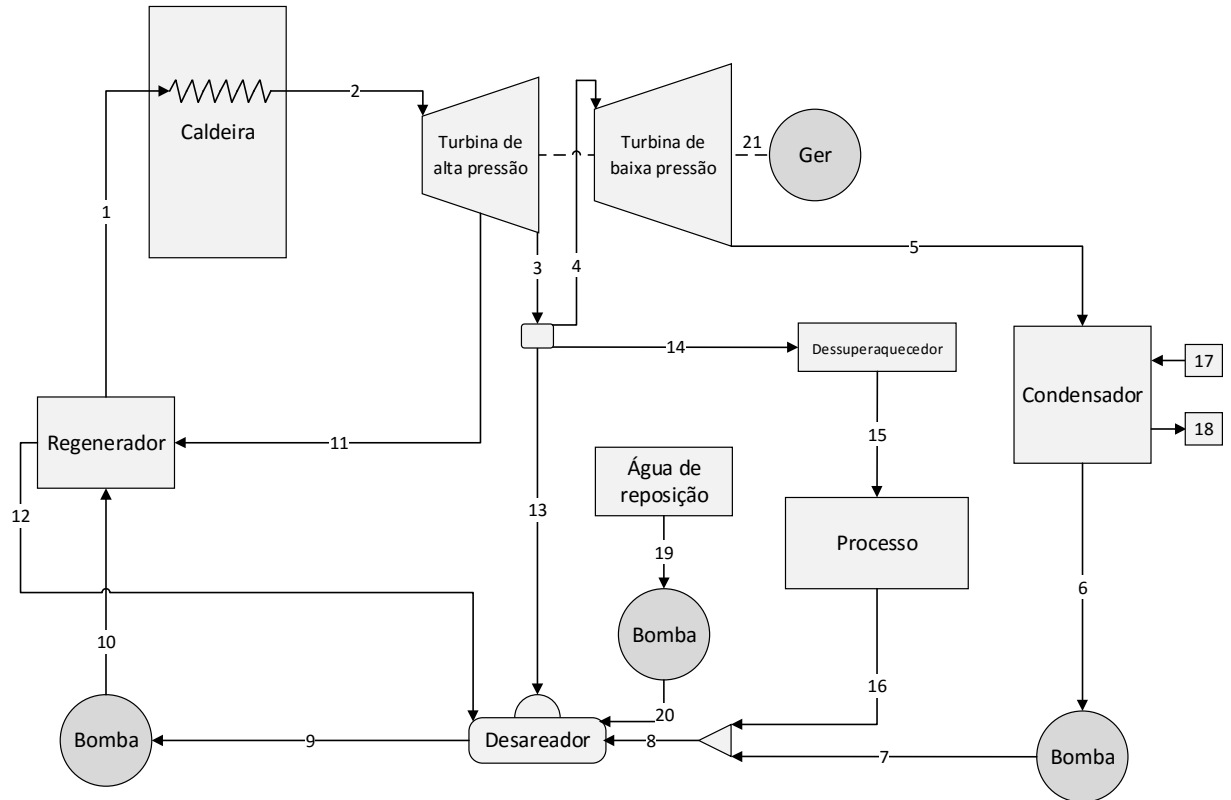


Figura 3.4 – Sistema de cogeração com um regenerador fechado (C2)

A Equação (3.1) foi modificada neste trabalho dado o fato que o primeiro regenerador empregado em todas as simulações foi o desaerador (funcionando como trocador de calor direto) e as condições de operação deste equipamento foram fixadas em todos os cenários (pressão constante de 2,5 bar). Neste sentido, a colocação dos regeneradores começaria então na saída do desaerador e não na saída do condensador.

Sendo assim a Equação (3.1) toma a seguinte forma:

$$\Delta T = \frac{(T_{sat})_{cald} - (T_{sat})_{desar}}{n + 1} \quad (3.2)$$

Onde a  $(T_{sat})_{cald}$  e a  $(T_{sat})_{desar}$  seriam as temperaturas de saturação correspondentes à pressão de operação da caldeira e do desaerador, respectivamente, e  $n$  continua sendo o número de regeneradores a utilizar, sem incluir o desaerador.

A Figura 3.5 apresenta a incorporação de múltiplos regeneradores ao ciclo de cogeração.

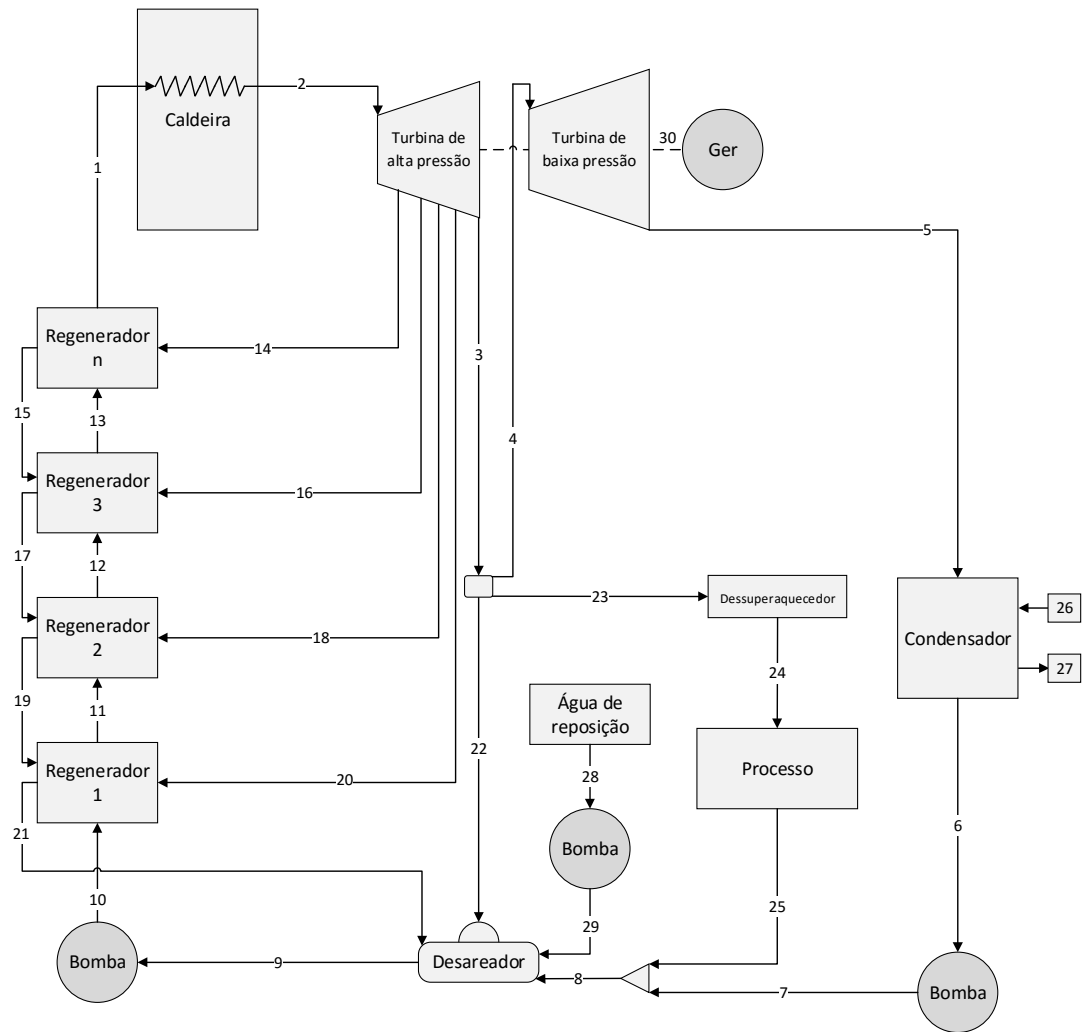


Figura 3.5 – Sistema de cogeração com múltiplos regeneradores fechados (C2)

A Tabela 3.4 resume os cálculos das pressões de extração para cada conjunto de regeneradores, a partir do cálculo do  $\Delta T$ .

Tabela 3.4 – Cálculo das pressões ótimas de extração para cada conjunto de regeneradores

| $n$ |   | $\Delta T^{11}$ | $T_{e\ ff}^{12}$ | $T_{s\ ff}^{13}$ | $T_{s\ fq}^{14}$ | $T_{sat\ fq}^{15}$ | $P@T_{sat\ fq}^{16}$ |
|-----|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|----------------------|
| 1   | 1 | 85,9            | 117,4            | 203,3            | 122,4            | 207,3              | 18,1                 |
| 2   | 1 | 57,3            | 117,4            | 174,7            | 122,4            | 178,7              | 9,7                  |
|     | 2 | 57,3            | 174,7            | 232,0            | 179,7            | 236,0              | 31,2                 |
| 3   | 1 | 43,0            | 117,4            | 160,4            | 122,4            | 164,4              | 6,9                  |
|     | 2 | 43,0            | 160,4            | 203,3            | 165,4            | 207,3              | 18,1                 |
|     | 3 | 43,0            | 203,3            | 246,3            | 208,3            | 250,3              | 40,0                 |
| 4   | 1 | 34,4            | 117,4            | 151,8            | 122,4            | 155,8              | 5,5                  |
|     | 2 | 34,4            | 151,8            | 186,2            | 156,8            | 190,2              | 12,6                 |
|     | 3 | 34,4            | 186,2            | 220,5            | 191,2            | 224,5              | 25,3                 |
|     | 4 | 34,4            | 220,5            | 254,9            | 225,5            | 258,9              | 46,1                 |
| 5   | 1 | 28,6            | 117,4            | 146,1            | 122,4            | 150,1              | 4,8                  |
|     | 2 | 28,6            | 146,1            | 174,7            | 151,1            | 178,7              | 9,7                  |
|     | 3 | 28,6            | 174,7            | 203,3            | 179,7            | 207,3              | 18,1                 |
|     | 4 | 28,6            | 203,3            | 232,0            | 208,3            | 236,0              | 31,2                 |
|     | 5 | 28,6            | 232,0            | 260,6            | 237,0            | 264,6              | 50,6                 |
| 6   | 1 | 24,6            | 117,4            | 142,0            | 122,4            | 146,0              | 4,3                  |
|     | 2 | 24,6            | 142,0            | 166,5            | 147,0            | 170,5              | 8,0                  |
|     | 3 | 24,6            | 166,5            | 191,1            | 171,5            | 195,1              | 14,0                 |
|     | 4 | 24,6            | 191,1            | 215,6            | 196,1            | 219,6              | 23,0                 |
|     | 5 | 24,6            | 215,6            | 240,2            | 220,6            | 244,2              | 36,0                 |
|     | 6 | 24,6            | 240,2            | 264,7            | 245,2            | 268,7              | 53,9                 |
| 7   | 1 | 21,5            | 117,4            | 138,9            | 122,4            | 142,9              | 3,9                  |
|     | 2 | 21,5            | 138,9            | 160,4            | 143,9            | 164,4              | 6,9                  |
|     | 3 | 21,5            | 160,4            | 181,9            | 165,4            | 185,9              | 11,5                 |

<sup>11</sup>  $\Delta T$ : diferencia de temperatura no regenerador

<sup>12</sup>  $T_{e\ ff}$ : temperatura de entrada da fonte fria

<sup>13</sup>  $T_{s\ ff}$ : temperatura de saída da fonte fria

<sup>14</sup>  $T_{s\ fq}$ : temperatura de saída da fonte quente

<sup>15</sup>  $T_{sat\ fq}$ : temperatura de saturação da fonte quente

<sup>16</sup>  $P@T_{sat\ fq}$ : pressão correspondente à temperatura de saturação da fonte quente (pressão de extração)

| $n$ |   | $\Delta T^{11}$ | $T_e \text{ ff}^{12}$ | $T_s \text{ ff}^{13}$ | $T_s \text{ fq}^{14}$ | $T_{\text{sat}} \text{ fq}^{15}$ | $P@T_{\text{sat}} \text{ fq}^{16}$ |
|-----|---|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|     | 4 | 21,5            | 181,9                 | 203,3                 | 186,9                 | 207,3                            | 18,1                               |
|     | 5 | 21,5            | 203,3                 | 224,8                 | 208,3                 | 228,8                            | 27,4                               |
|     | 6 | 21,5            | 224,8                 | 246,3                 | 229,8                 | 250,3                            | 40,0                               |
|     | 7 | 21,5            | 246,3                 | 267,8                 | 251,3                 | 271,8                            | 56,6                               |
|     | 1 | 19,1            | 117,4                 | 136,5                 | 122,4                 | 140,5                            | 3,7                                |
|     | 2 | 19,1            | 136,5                 | 155,6                 | 141,5                 | 159,6                            | 6,1                                |
|     | 3 | 19,1            | 155,6                 | 174,7                 | 160,6                 | 178,7                            | 9,7                                |
| 8   | 4 | 19,1            | 174,7                 | 193,8                 | 179,7                 | 197,8                            | 14,8                               |
|     | 5 | 19,1            | 193,8                 | 212,9                 | 198,8                 | 216,9                            | 21,8                               |
|     | 6 | 19,1            | 212,9                 | 232,0                 | 217,9                 | 236,0                            | 31,2                               |
|     | 7 | 19,1            | 232,0                 | 251,1                 | 237,0                 | 255,1                            | 43,3                               |
|     | 8 | 19,1            | 251,1                 | 270,2                 | 256,1                 | 274,2                            | 58,7                               |

### 3.1.5. Descrição do ciclo de cogeração com reaquecimento e regeneração (C3)

As simulações para o ciclo Rankine com reaquecimento e regeneração simultânea foram realizadas com os mesmos parâmetros de operação do cenário regenerativo ( $DTT$ ,  $DCA$  e  $\Delta T$ ), incorporando uma etapa de reaquecimento.

A extração para reaquecimento ocorre em diferentes níveis de pressão para cada configuração do ciclo (dois regeneradores, três regeneradores, até oito regeneradores), sendo esta a principal variável nas análises (pressão de reaquecimento,  $P_r$ ). A temperatura de reaquecimento,  $T_r$ , é a mesma temperatura de saída de vapor da caldeira para os diferentes arranjos, igual a 520°C (BADR; PROBERT; O'CALLAGHAN, 1990).

A Figura 3.6 apresenta a incorporação do reaquecimento e regeneração ao ciclo de cogeração.



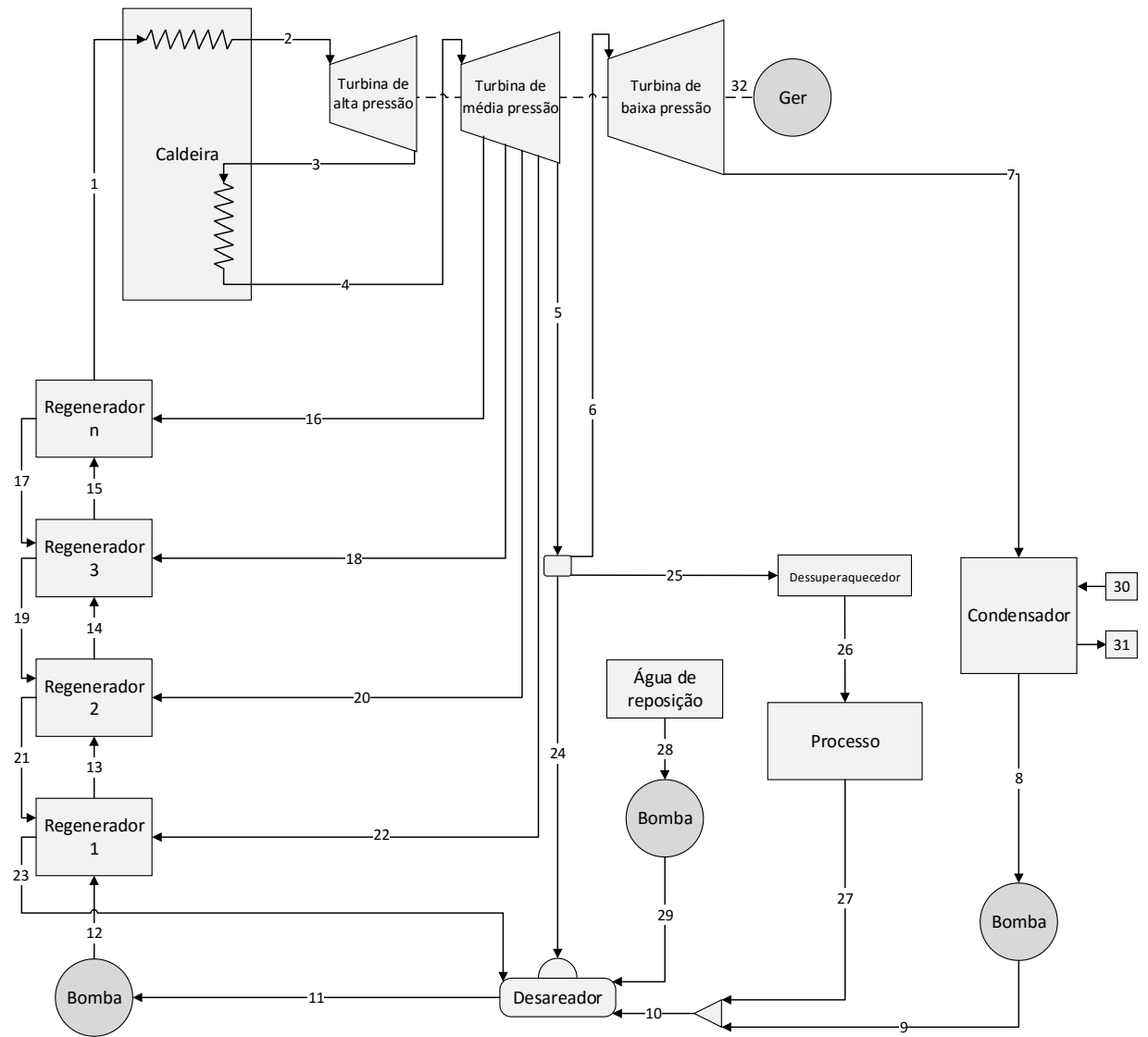


Figura 3.6 – Sistema de cogeração com reaquecimento e regeneração (C3)

## 4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

### 4.1. Ciclo com reaquecimento (C1)

Os resultados para consumo de bagaço na caldeira e geração de vapor vivo tanto no sistema convencional quanto com reaquecimento são mostrados na Tabela 4.1. Esses resultados tiveram como base os dados que se encontram nas Tabela 3.1 a Tabela 3.3, lembrando-se que as simulações foram divididas em dois grupos, o Grupo I (com capacidade de geração de vapor de 265 t/h com e potência instalada de 50,4 MW) e o Grupo II (com capacidade de geração de vapor de 281,5 t/h e potência instalada de 55,0 MW).

Tabela 4.1 – Consumo de bagaço e produção de vapor para os sistemas convencional (C0) e com reaquecimento (C1).

|                                  | Grupo I |        | Grupo II |        |           |
|----------------------------------|---------|--------|----------|--------|-----------|
|                                  | C0      | C1     | C0       | C1     |           |
| Consumo bagaço sistema cogeração | 226,51  | 222,62 | 240,77   | 236,28 | kg/t cana |
| Vapor vivo gerado                | 529,60  | 481,66 | 562,95   | 509,50 | kg/t cana |
| Razão vapor/bagaço               | 2,19    | 2,03   | 2,34     | 2,16   |           |

Com relação à produção específica de vapor na caldeira (ver Tabela 4.1), pode-se observar uma redução deste parâmetro no C1. O que traduz a necessidade de menor quantidade de vapor por unidade de cana-de-açúcar processada para gerar a mesma potência elétrica.

No Grupo I é necessário produzir 2,19 kg de vapor por kg de cana-de-açúcar processada no caso base (C0), enquanto que, com reaquecimento (C1) se precisa de 2,03 kg. No Grupo II muda de 2,34 kg de vapor por kg de cana processada no caso convencional, para 2,16 kg com reaquecimento. O Grupo II tem valores maiores que no caso do Grupo I por ter maior potência instalada.

A Tabela 4.2 mostra o excedente de energia elétrica para o sistema com reaquecimento e para o sistema convencional. Os resultados confirmam de maneira quantitativa as vantagens das modificações efetuadas ao sistema de cogeração com o uso de reaquecimento. A variação da pressão de reaquecimento influi na quantidade de biomassa necessária na caldeira para obter a vazão de vapor que ao expandir consegue a potência fixada.

Tabela 4.2 – Resultados para energia gerada e consumida nos sistemas convencional (C0) e com reaquecimento (C1)

|                            | Grupo I |        | Grupo II |        |            |
|----------------------------|---------|--------|----------|--------|------------|
|                            | C0      | C1     | C0       | C1     |            |
| Energia elétrica produzida | 100,78  | 100,78 | 110,00   | 110,00 | kWh/t cana |
| Excedente de eletricidade  | 66,78   | 66,78  | 76,00    | 76,00  | kWh/t cana |

#### 4.1.1. Determinação da pressão ótima de reaquecimento

A pressão ótima de reaquecimento foi determinada tendo em conta a máxima eficiência do ciclo de cogeração. Portanto, foi escolhido o valor que permitisse alcançar a maior quantidade de bagaço excedente na planta e a maior eficiência exergética.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados do bagaço excedente e da eficiência exergética para a pressão de reaquecimento ótima.

Tabela 4.3 – Resultados para o bagaço excedente e a eficiência exergética nos sistemas convencional (C0) e com reaquecimento (C1)

|                       | Grupo I |       | Grupo II |       |   |
|-----------------------|---------|-------|----------|-------|---|
|                       | C0      | C1    | C0       | C1    |   |
| Bagaço excedente      | 0       | 1,72  | 0        | 1,86  | % |
| Eficiência exergética | 25,80   | 26,25 | 25,54    | 26,03 | % |

Bagaço excedente em relação ao bagaço consumido no ciclo convencional

Os resultados das simulações indicam uma variação percentual máxima no excedente de bagaço de 1,72% no cenário com reaquecimento (C1) com relação ao cenário base (C0) no Grupo I. Se comparar esses dois cenários no Grupo II, a diferença é de 1,86 pontos percentuais, 0,14 pontos a mais do que o Grupo I.

A diferença torna-se atrativa ao comparar Grupo I e Grupo II diretamente. No Grupo I o bagaço excedente atinge 10,12% sem reaquecimento e 11,66% com reaquecimento, enquanto no Grupo II os valores de bagaço excedente caem para 4,46% sem reaquecimento e 6,24% com reaquecimento.

A principal diferença entre os dois grupos é o comportamento do ciclo conforme varia a pressão de extração para reaquecimento. Existe uma faixa na pressão de extração para reaquecimento no Grupo I, onde o sistema é inviável termodinamicamente (ver descontinuidade da curva para o Grupo I nas Figura 4.1 e Figura 4.2).

Para extrações entre 6 e 39 bar no Grupo I ( $P_r/P_c$  entre 0,06 e 0,46), o ciclo não tem a vazão de vapor suficiente para suprir as demandas de vapor do processo.

Analisando os resultados do Grupo II, com maior capacidade de geração de vapor, toda a faixa de possíveis extrações se torna viável (desde 2,5 até 85 bar). Portanto podem ser feitas extrações para reaquecimento em qualquer nível de pressão, conseguido suprir totalmente a demanda de vapor para processo e ter vapor disponível nos últimos estágios da turbina.

Nas Figura 4.1 e Figura 4.2 é mostrado o comportamento do excedente de biomassa e a eficiência exergética, em função da pressão de reaquecimento. Verifica-se claramente a existência de um ponto onde cada um destes indicadores apresenta um valor máximo.

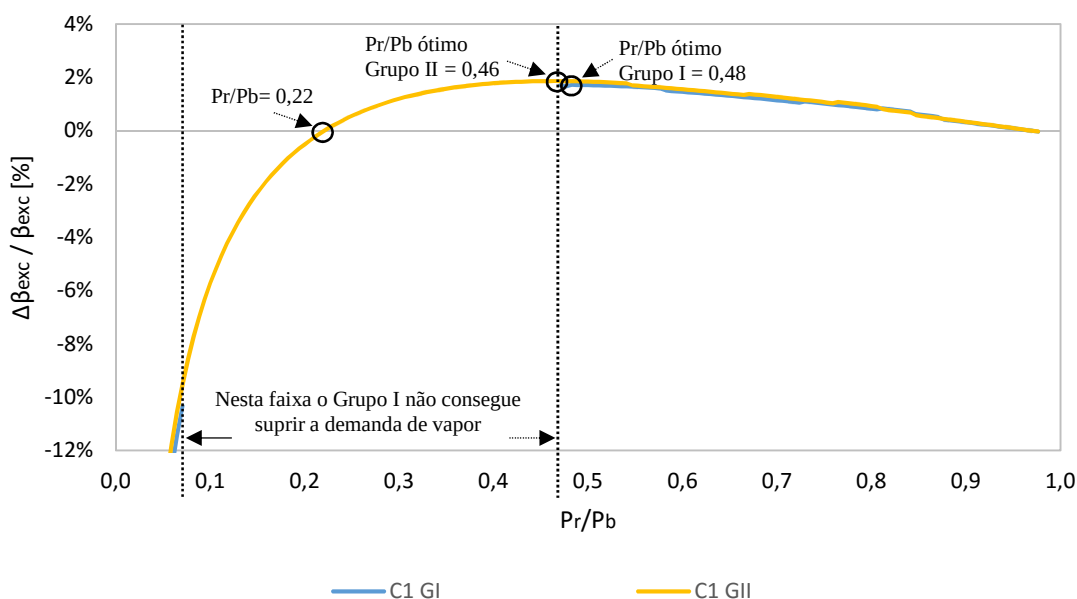


Figura 4.1 – Influência da pressão de reaquecimento sobre o excedente de bagaço

A eficiência exergética, é ilustrada na Figura 4.2. O cenário com reaquecimento (C1), torna-se vantajoso em relação ao C0 quando a relação de pressões  $P_r/P_b$ , ultrapassa o valor de 0,48 no Grupo I e 0,22 no Grupo II. No ponto máximo desta curva tem-se a relação de pressão que conduz a máxima eficiência exergética, 0,48 para o Grupo I e em 0,46 para o Grupo II.

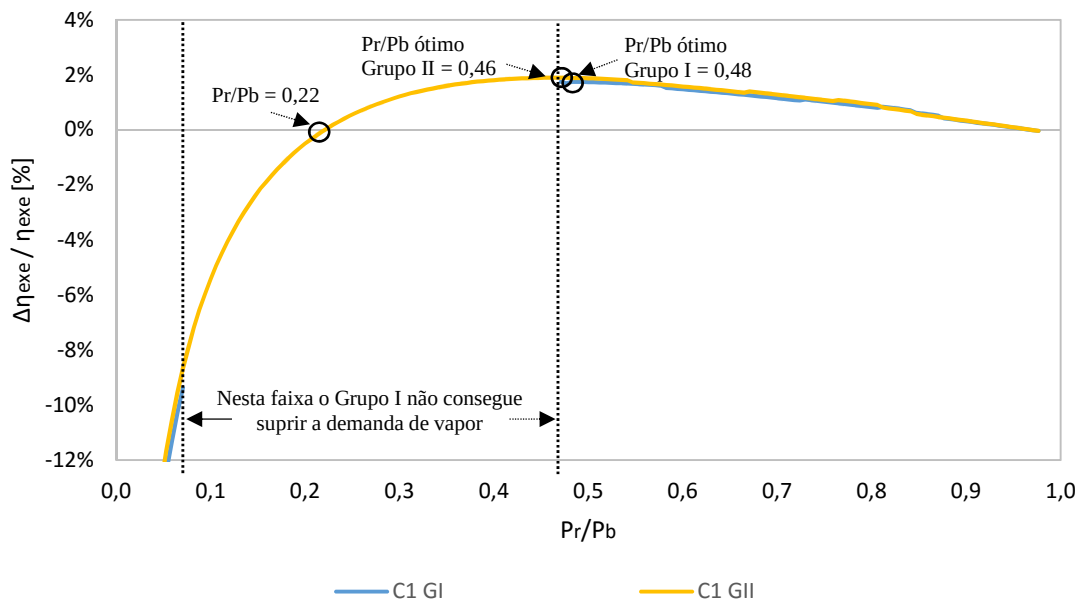


Figura 4.2 – Influência da pressão de reaquecimento sobre a eficiência exergética

Considera-se então a pressão adimensional em 0,46 como ponto ótimo para realizar o reaquecimento, dado o fato que nela se atinge a maior eficiência exergética do sistema e o menor consumo de combustível; além disso, pode-se obter um aumento do título do vapor na saída da turbina (de 0,89 para 0,94) o que diminui a erosão nas paletas sem sacrificar o desempenho do sistema.

Uma pressão de reaquecimento próxima à pressão inicial ( $P_r/P_b$  próximo a 1) não consegue melhorar a eficiência do ciclo, apenas uma pequena porção do calor adicional é fornecido a uma temperatura elevada. Quando a pressão de reaquecimento é muito baixa ( $P_r/P_b \ll 0,22$ ) resulta em variação percentual negativa já que isto diminui a temperatura média de adição de calor ao ciclo, prejudicando seu desempenho.

#### 4.1.2. Efeito da extração de vapor de processo sobre a pressão ótima de reaquecimento

A literatura indica que a relação de pressão de reaquecimento ideal para a maioria das usinas modernas está na faixa de 0,20 a 0,25 (BADR; PROBERT; O'CALLAGHAN, 1990), (NAG, 2008) neste domínio, a relação  $P_r/P_b$  atinge o máximo incremento na eficiência do ciclo Rankine em plantas termelétricas.

Como um dos objetivos de estudo neste trabalho é a aplicação do reaquecimento em usinas sucroalcooleiras brasileiras, foi analisado o efeito que produz a extração de vapor para

processo sobre a pressão ótima de reaquecimento. Esta consideração tem especial importância pois os valores ótimos recomendados na literatura, estão voltados a usinas termelétricas com geração exclusiva de energia elétrica, e não faz menção dos ciclos de cogeração.

Levando em conta que a maioria de usinas sucroalcooleiras opera tipicamente com ciclos de potência em cogeração, e que as demandas de vapor para processo representam uma significativa porcentagem da vazão mássica total, torna-se importante a análise deste parâmetro.

Para tal efeito foi variado o consumo específico de vapor desde um valor mínimo de 0 kg de vapor por tonelada de cana processada, que corresponde a uma usina termelétrica sem cogeração, até 450 kg de vapor por tonelada de cana, visando uma usina sucroalcooleira convencional. O objetivo é verificar o comportamento da pressão ótima de reaquecimento em relação à variação da vazão de vapor extraída da turbina para ser usado no processo de fabricação de açúcar e álcool. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4 e na Figura 4.3 a seguir.

Tabela 4.4 – Variação da relação de pressão  $P_r/P_b$  ótima com a extração de vapor para processo.

| kg vap/tc             | 0     | 50     | 100    | 150    | 200    | 250    | 300    | 350    | 400    | 450    |
|-----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| kg/s vap              | 0,00  | 6,94   | 13,89  | 20,83  | 27,78  | 34,72  | 41,67  | 48,61  | 55,56  | 62,50  |
| $P_r/P_b$             | 0,21  | 0,26   | 0,29   | 0,32   | 0,35   | 0,38   | 0,41   | 0,42   | 0,45   | 0,46   |
| Extração de vapor [%] | 0,00% | 14,34% | 27,07% | 38,41% | 48,67% | 57,96% | 66,50% | 74,41% | 81,60% | 88,32% |

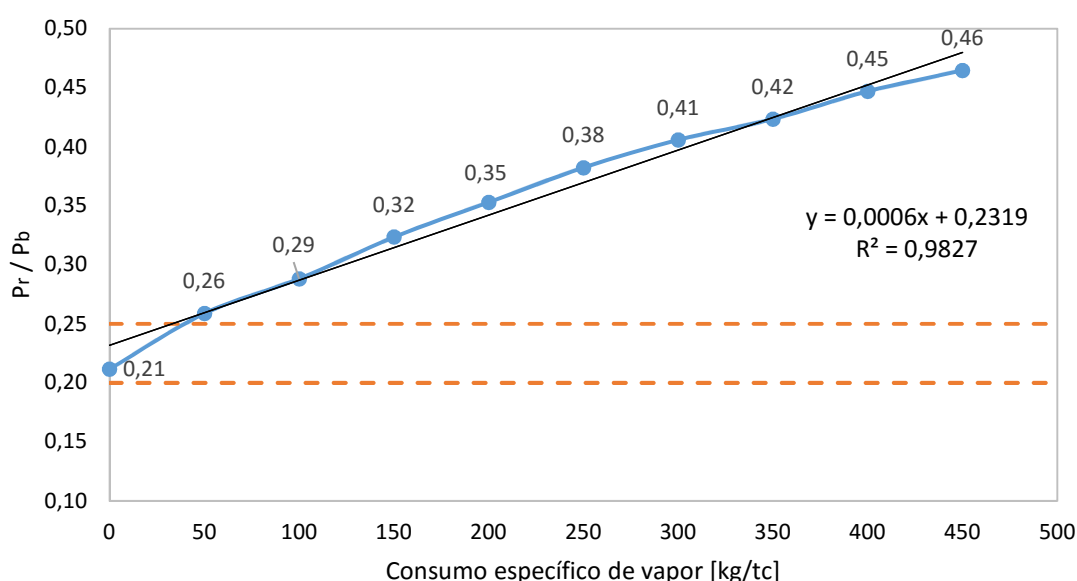


Figura 4.3 – Variação da relação de pressão  $P_r/P_b$  ótima com a extração de vapor para processo

Os resultados indicam que conforme aumenta o consumo específico de vapor para processo, aumenta a relação  $P_r/P_b$  que maximiza a eficiência. No caso inicial, quando a extração para processo é nula, o seja, quando o ciclo opera somente para gerar energia elétrica, o resultado da relação ótima  $P_r/P_b$  é de 0,21; conforme estabelecido por Nag (2008).

Para um consumo de 50 kg de vapor por tonelada de cana processada a pressão ótima de reaquecimento ultrapassa o limite superior que relata a literatura. A partir deste nível de extração a relação  $P_r/P_b$  aumenta até obter um valor de 0,46 que corresponde ao consumo de vapor específico típico em usinas sucroalcooleiras adotada neste trabalho 450 kg vapor/tc.

## 4.2. Ciclo regenerativo (C2)

Para a avaliação do número adequado de regeneradores na planta foi considerada a capacidade de geração de vapor, de forma tal que a quantidade total de vapor produzida no ciclo defina a quantidade mínima e máxima de regeneradores que possam ser instalados.

### 4.2.1. Grupo I

A Tabela 4.5 mostra os resultados das simulações para o consumo de bagaço no sistema de cogeração, vapor gerado, assim como a relação vapor por cana processada, em conformidade com os parâmetros de entrada descritos nas Tabela 3.1 a Tabela 3.3

No cenário regenerativo (C2) com capacidade de geração de vapor de 265 t/h, a quantidade máxima de regeneradores que podem ser instalados é de 2 (dois). A partir do terceiro regenerador não há vapor suficiente para suprir a demanda de vapor do processo.

Tabela 4.5 – Consumo de bagaço e produção de vapor para os sistemas convencional (C0) e com regeneração (C2) no Grupo I

|                                  |        | Grupo I |        |           |
|----------------------------------|--------|---------|--------|-----------|
|                                  | C0     | C2      |        |           |
| Número de regeneradores          |        | 1       | 2      |           |
| Consumo bagaço sistema cogeração | 252,0  | 239,91  | 237,21 | kg/t cana |
| Vapor vivo gerado                | 529,60 | 575,57  | 599,49 | kg/t cana |
| Razão vapor/bagaço               | 2,19   | 2,51    | 2,64   |           |

A produção específica de vapor variou de 2,19 para 2,51 quando é incorporado um regenerador e para 2,64 quando são instalados dois regeneradores. O sistema é capaz de gerar mais vapor por unidade de bagaço consumido, com dois regeneradores instalados, passa de 529,6 para 599,5 kg de vapor por tonelada de cana processada, um acréscimo de 13,2% a mais com relação ao ciclo base.

A Figura 4.4 apresenta a variação percentual no excedente de bagaço no Cenário Regenerativo (C2) com relação ao cenário base (C0) para o Grupo I.

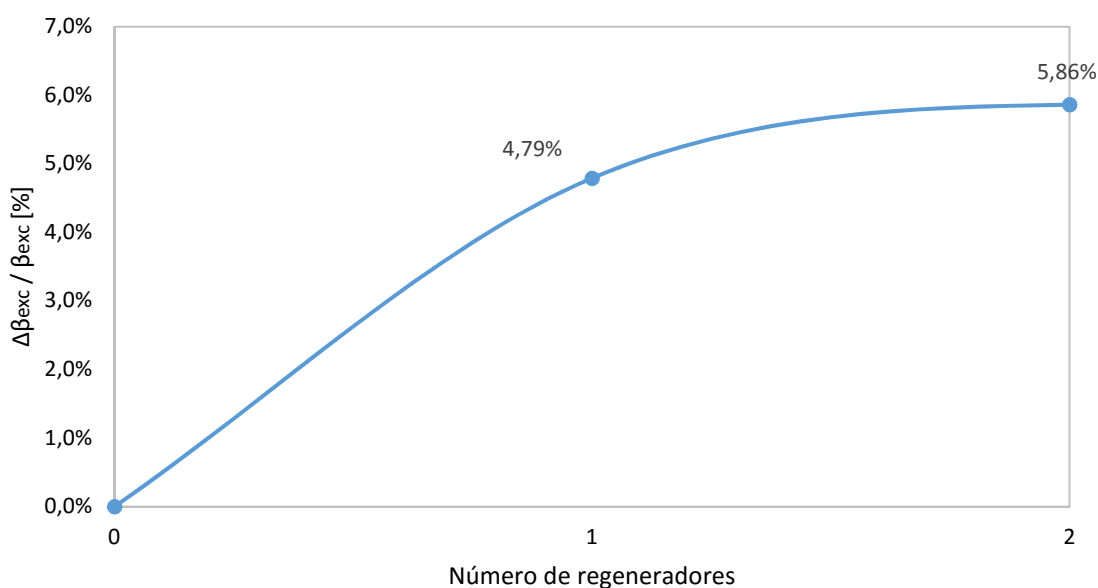


Figura 4.4 – Variação percentual no excedente de bagaço no cenário regenerativo (C2) com relação ao cenário base (C0) para o Grupo I.

O ciclo com um regenerador só atinge, com relação ao Cenário Base (C0), um aumento na quantidade de bagaço excedente de 4,79%. Com dois regeneradores, o excedente de bagaço passa a 5,86%.

Na Figura 4.5, pode-se apreciar o efeito isolado que tem a incorporação de cada regenerador. Assim, a introdução de um primeiro aquecedor aumenta o excedente de bagaço em 4,79%, com relação ao cenário convencional. Já com a incorporação do segundo regenerador o excedente de bagaço aumenta em 1,07%.



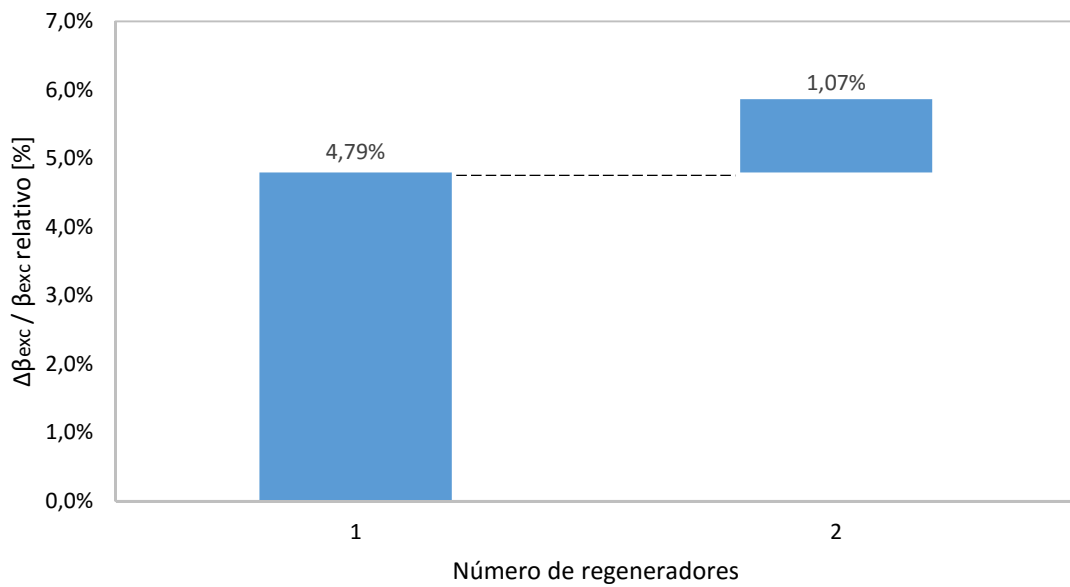


Figura 4.5 – Variação percentual relativa no excedente de bagaço no Cenário Regenerativo (C2) com relação ao Cenário Base (C0) para Grupo I

A Figura 4.6 apresenta a variação percentual na eficiência exergética no Cenário Regenerativo (C2) com relação ao cenário base (C0) para o Grupo I.

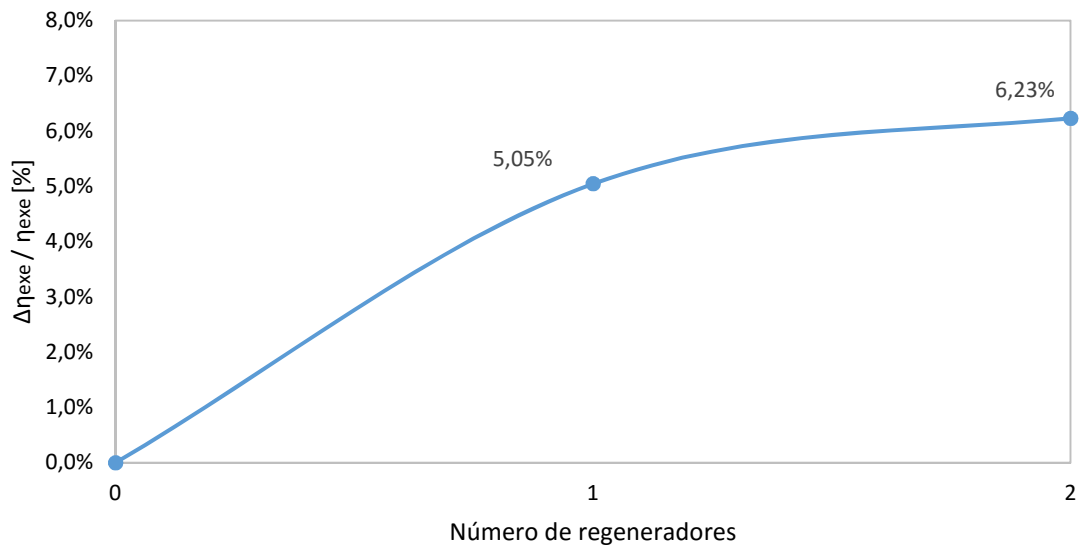


Figura 4.6 – Variação percentual na eficiência exergética para o sistema com regeneração no Grupo I

Com relação ao Cenário Base (C0) o ciclo com um regenerador só consegue aumento na eficiência exergética da planta de 5,05%, já com dois regeneradores, a eficiência exergética passa a 6,23%.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados para o bagaço excedente e a eficiência exergética

Tabela 4.6 – Resultados para o bagaço excedente e a eficiência exergética nos sistemas convencional (C0) e com regeneração (C2), Grupo I

|                         | Grupo I |       |       |   |
|-------------------------|---------|-------|-------|---|
|                         | C0      | C2    |       |   |
|                         |         | 1     | 2     |   |
| Número de regeneradores |         |       |       |   |
| Bagaço excedente        | 0       | 4,79  | 5,86  | % |
| Eficiência exergética   | 25,80   | 27,10 | 27,40 | % |

Bagaço excedente em relação ao bagaço consumido no ciclo convencional

#### 4.2.2. Grupo II

No cenário regenerativo (C2) com capacidade de geração do vapor de 281,5 t/h, a quantidade máxima de regeneradores que podem ser instalados é de 8 (oito). O ciclo de cogeração tem vapor suficiente para suprir a demanda de vapor do processo sem problemas.

Tabela 4.7 – Consumo de bagaço e produção de vapor para os sistemas convencional (C0) e com regeneração (C2) no Grupo II

|                          |        | Grupo II |        |        |        |        |        |        |        |           |
|--------------------------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
|                          | C0     | C2       |        |        |        |        |        |        |        |           |
| Número de regeneradores  |        | 1        | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |           |
| Consumo                  |        |          |        |        |        |        |        |        |        |           |
| bagaço sistema cogeração | 240,77 | 229,24   | 226,67 | 225,27 | 224,36 | 223,82 | 223,36 | 223,07 | 222,80 | kg/t cana |
| Vapor vivo gerado        | 562,95 | 611,84   | 637,31 | 651,33 | 660,22 | 666,71 | 671,09 | 674,82 | 677,58 | kg/t cana |
| Razão vapor/bagaço       | 2,34   | 2,67     | 2,81   | 2,89   | 2,94   | 2,98   | 3,00   | 3,03   | 3,04   |           |

A produção específica de vapor, para a simulação realizada nesse sistema, variou de 2,34 até 3,04. O sistema gerou mais vapor por unidade de bagaço consumido com cada regenerador instalado, passando de 562,95 para 677,58 kg de vapor por tonelada de cana processada, o seja até 16,92% a mais.

Conforme são adicionados regeneradores ao sistema, a eficiência exergética do sistema aumenta e a quantidade de bagaço excedente incrementa-se até 7,13 pontos percentuais em relação ao ciclo de cogeração convencional.

A Figura 4.7 apresenta a variação percentual do excedente de bagaço no Grupo II em função do número de regeneradores instalados. O excedente de bagaço apresenta incrementos na faixa de 4,79 a 7,46%.

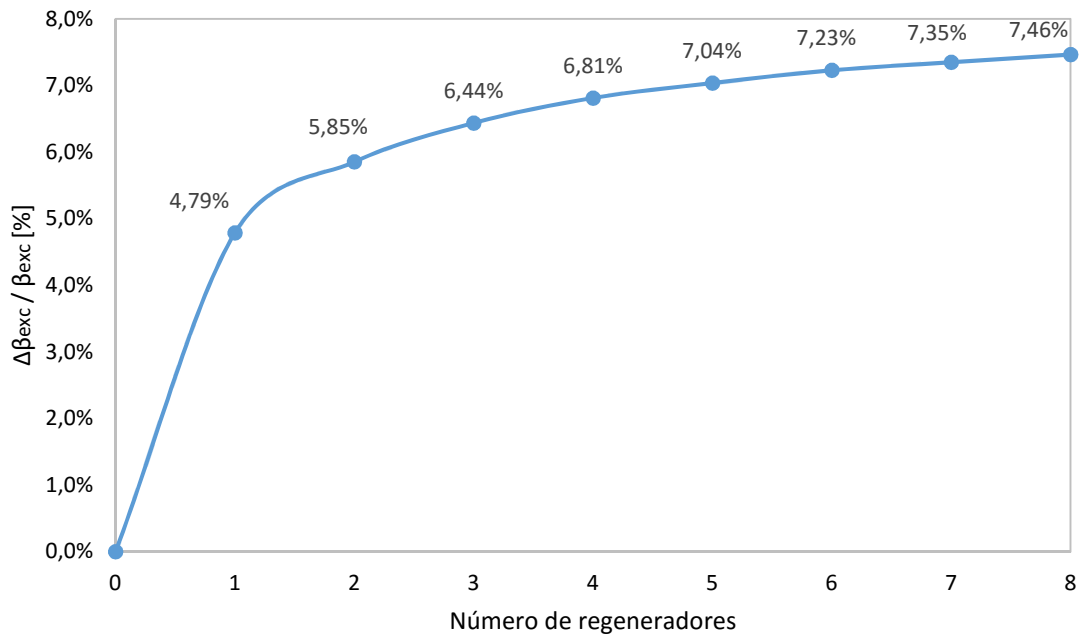


Figura 4.7 – Variação percentual no excedente de bagaço para o sistema com regeneração no Grupo II

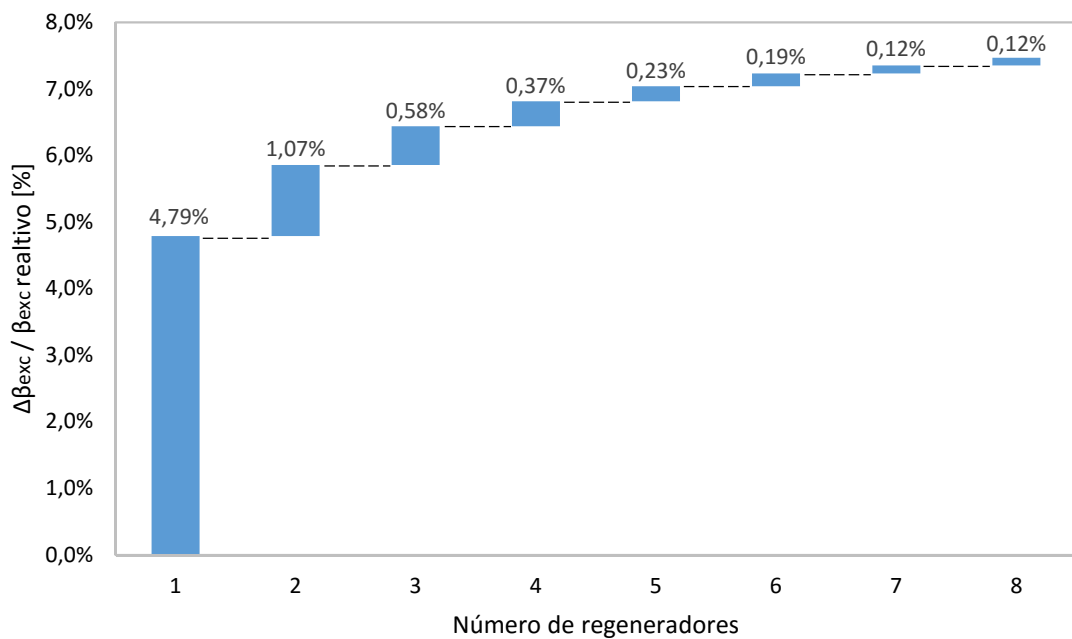


Figura 4.8 – Variação percentual relativa no excedente de bagaço para o sistema com regeneração no Grupo II

Na Figura 4.8 pode-se apreciar o efeito individual que cada regenerador tem na geração de bagaço excedente. A introdução de um primeiro regenerador aumenta o excedente de bagaço em 4,79%. Um segundo regenerador aumenta o excedente em 1,07%. Com o terceiro trocador regenerativo o acréscimo é de 0,58%, e assim o incremento descreve uma tendência a diminuir conforme aumenta o número de regeneradores.

Uma vez que o ganho na eficiência do ciclo é proporcional ao ganho de temperatura da água de alimentação (ver Tabela 4.8), verifica-se que o ganho de eficiência segue a lei de retorno decrescente com o aumento do número de aquecedores, tal como relata Nag, (2008).

De fato, o maior incremento da eficiência é originado pelo primeiro aquecedor. Os incrementos para cada aquecedor adicional diminuem sucessivamente (Figura 4.8). O número de aquecedores é definido tendo em conta uma análise técnica econômica da planta. O número ótimo de regeneradores se consegue quando é verificado que o custo de adicionar mais um aquecedor não justifica a economia de combustível. Na prática são utilizados de cinco a sete pontos de extração para aquecimento regenerativo (NAG, 2008).

Analizando-se a influência do número de regeneradores sobre a eficiência exergética (ver Figura 4.9), pode-se perceber que o aumento na quantidade destes equipamentos no ciclo sempre é benéfico.

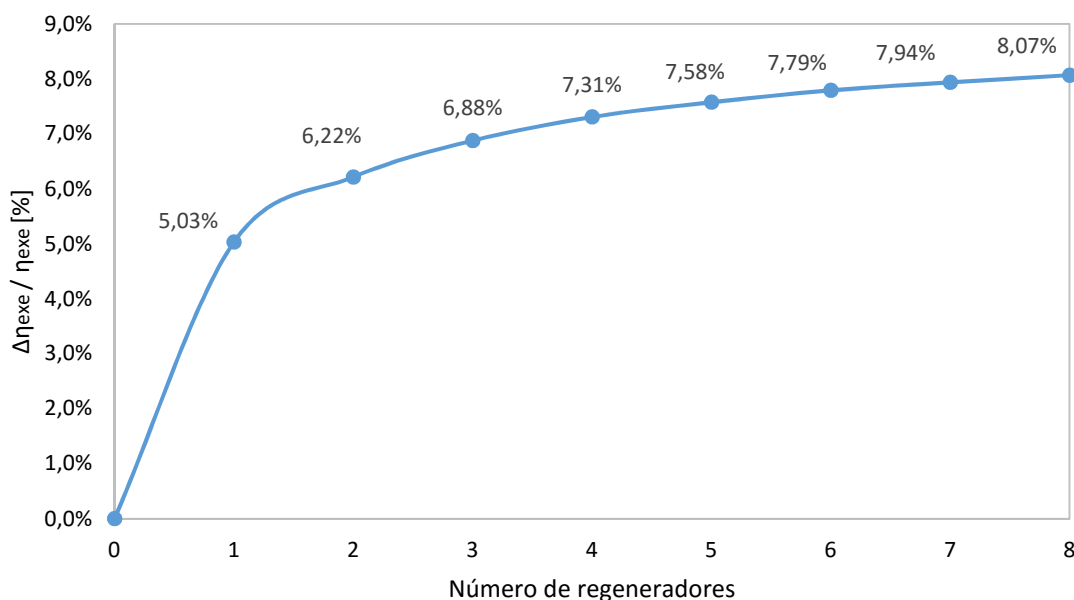


Figura 4.9 – Variação percentual na eficiência exergética para o sistema com regeneração no Grupo II

Tabela 4.8 – Resultados nos ganhos de temperatura de cada regenerador

| $n$ |   | $P@T_{sat} f_q^{17}$ | $m_{per}^{18}$ | $\Delta T^{19}$ | $\Delta T_{sim}^{20}$ | $\Delta T_{total sim}^{21}$ |
|-----|---|----------------------|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------|
| 1   | 1 | 18,1                 | 11,19%         | 85,9            | 84,1                  | 84,1                        |
| 2   | 1 | 9,7                  | 10,68%         | 57,3            | 55,5                  | 112,7                       |
|     | 2 | 31,2                 | 8,82%          | 57,3            | 57,3                  |                             |
| 3   | 1 | 6,9                  | 8,47%          | 43,0            | 41,2                  | 127,1                       |
|     | 2 | 18,1                 | 7,33%          | 43,0            | 43,0                  |                             |
|     | 3 | 40,0                 | 6,31%          | 43,0            | 42,9                  |                             |
| 4   | 1 | 5,5                  | 7,04%          | 34,4            | 32,6                  | 135,7                       |
|     | 2 | 12,6                 | 6,20%          | 34,4            | 34,4                  |                             |
|     | 3 | 25,3                 | 5,58%          | 34,4            | 34,4                  |                             |
|     | 4 | 46,1                 | 4,88%          | 34,4            | 34,4                  |                             |
| 5   | 1 | 4,8                  | 6,04%          | 28,6            | 27,1                  | 141,4                       |
|     | 2 | 9,7                  | 5,38%          | 28,6            | 28,3                  |                             |
|     | 3 | 18,1                 | 4,92%          | 28,6            | 28,8                  |                             |
|     | 4 | 31,2                 | 4,45%          | 28,6            | 28,6                  |                             |
|     | 5 | 50,6                 | 4,00%          | 28,6            | 28,6                  |                             |
| 6   | 1 | 4,3                  | 5,28%          | 24,6            | 23,0                  | 145,4                       |
|     | 2 | 8,0                  | 4,77%          | 24,6            | 24,2                  |                             |
|     | 3 | 14,0                 | 4,36%          | 24,6            | 24,6                  |                             |
|     | 4 | 23,0                 | 4,05%          | 24,6            | 24,5                  |                             |
|     | 5 | 36,0                 | 3,72%          | 24,6            | 24,6                  |                             |
|     | 6 | 53,9                 | 3,36%          | 24,6            | 24,5                  |                             |
| 7   | 1 | 3,9                  | 4,72%          | 21,5            | 19,7                  | 148,5                       |
|     | 2 | 6,9                  | 4,27%          | 21,5            | 21,5                  |                             |
|     | 3 | 11,5                 | 3,94%          | 21,5            | 21,5                  |                             |
|     | 4 | 18,1                 | 3,66%          | 21,5            | 21,5                  |                             |

<sup>17</sup>  $P@T_{sat} f_q$ : pressão correspondente à temperatura de saturação da fonte quente (pressão de extração)<sup>18</sup>  $m_{per}$ : fração de massa percentual (com relação a vazão mássica total)<sup>19</sup>  $\Delta T$ : diferença de temperatura no regenerador<sup>20</sup>  $\Delta T_{sim}$ : diferença de temperatura obtida na simulação<sup>21</sup>  $\Delta T_{total sim}$ : ganho total de temperatura da água de alimentação

| $n$ |   | $P@T_{sat} \text{ } f_{q^{17}}$ | $m_{per}^{18}$ | $\Delta T^{19}$ | $\Delta T_{sim}^{20}$ | $\Delta T_{total \text{ } sim}^{21}$ |
|-----|---|---------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------|--------------------------------------|
|     | 5 | 27,4                            | 3,44%          | 21,5            | 21,5                  |                                      |
|     | 6 | 40,0                            | 3,25%          | 21,5            | 21,5                  |                                      |
|     | 7 | 56,6                            | 2,85%          | 21,5            | 21,5                  |                                      |
| 8   | 1 | 3,7                             | 4,26%          | 19,1            | 17,3                  |                                      |
|     | 2 | 6,1                             | 3,88%          | 19,1            | 19,1                  |                                      |
|     | 3 | 9,7                             | 3,53%          | 19,1            | 19,1                  |                                      |
|     | 4 | 14,8                            | 3,43%          | 19,1            | 19,1                  |                                      |
|     | 5 | 21,8                            | 3,16%          | 19,1            | 19,4                  |                                      |
|     | 6 | 31,2                            | 3,00%          | 19,1            | 18,7                  |                                      |
|     | 7 | 43,3                            | 2,86%          | 19,1            | 19,1                  |                                      |
|     | 8 | 58,7                            | 2,49%          | 19,1            | 19,1                  | 150,9                                |

A Tabela 4.9 mostra a produção, consumo e o excedente de energia elétrica para o sistema regenerativo e para o sistema convencional.

Tabela 4.9 – Resultados para energia gerada e consumida nos sistemas convencional (C0) e com regeneração (C2)

|                            | Grupo I |        |        | Grupo II |        |        |            |
|----------------------------|---------|--------|--------|----------|--------|--------|------------|
|                            | 0       | 1      | 2      | 0        | 1      | 2      |            |
| Energia elétrica produzida | 100,78  | 100,78 | 100,78 | 110,00   | 110,00 | 110,00 | kWh/t cana |
| Excedente de eletricidade  | 66,78   | 66,78  | 66,78  | 110,00   | 110,00 | 110,00 | kWh/t cana |

A dependência prevista no desempenho de um ciclo Rankine em cogeração com trocadores de calor para o aquecimento da água de alimentação da caldeira, é resumida na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resultados para o bagaço excedente e a eficiência exergética no Cenário Regenerativo (C2) com relação ao Cenário Base (C0) para o Grupo II

| Número de regeneradores | Grupo II |       |       |       |       |       |       |       |       |   |
|-------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
|                         | C0       | C2    |       |       |       |       |       |       |       |   |
|                         |          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |   |
| Bagaço excedente        | 0        | 4,79  | 5,85  | 6,44  | 6,81  | 7,04  | 7,23  | 7,35  | 7,46  | % |
| Eficiência exergética   | 25,54    | 26,83 | 27,13 | 27,30 | 27,41 | 27,48 | 27,53 | 27,57 | 27,60 | % |

Bagaço excedente em relação ao bagaço consumido no ciclo convencional

A Tabela 4.10 mostra um aumento no de excedente de bagaço de até 11,59% com relação ao bagaço disponível e de até 7,46% com relação ao Cenário Base (C0).

### 4.3. Ciclo com reaquecimento e regeneração simultâneo (C3).

Analogamente à análise do Cenário Regenerativo (C2), foi verificado o efeito do uso combinado do reaquecimento e da regeneração no ciclo de cogeração, utilizando os mesmos critérios seguidos nas seções anteriores.

Bejan (2006) propõe uma metodologia para maximizar a eficiência do ciclo de cogeração quando utilizados reaquecimento e regeneração juntos. Nela estabelece duas alternativas, dependendo da ordem de aplicação. No primeiro caso é possível fazer a análise de sensibilidade para determinar a pressão de reaquecimento que consegue a eficiência máxima do ciclo e a partir dessa configuração continuar com a incorporação dos regeneradores. A segunda alternativa propõe estabelecer a distribuição dos regeneradores ao longo do ciclo e partir desse ponto, continuar com a análise de sensibilidade para determinar a pressão de reaquecimento que permite atingir a melhor eficiência.

Neste trabalho foi adotada a segunda alternativa, aproveitando a distribuição dos regeneradores conseguida na seção anterior e a partir desse esquema foi incorporado o reaquecimento.

As Tabela 4.11 mostram os resultados das simulações para o consumo de bagaço, geração de vapor e a relação vapor por unidade de cana processada, usando reaquecimento e regeneração no ciclo de cogeração, em conformidade com os parâmetros descritos nas Tabela 3.1 a Tabela 3.3.

Tabela 4.11 – Consumo de bagaço e produção de vapor para os sistemas convencional (C0) e com reaquecimento e regeneração (C3) no Grupo II

| Número de regeneradores          | C0     | Grupo II<br>C3 |        |        |        |        |        |        |        |           |
|----------------------------------|--------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
|                                  |        | 1              | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |           |
| Consumo bagaço sistema cogeração | 240,77 | 227,36         | 225,14 | 224,07 | 223,25 | 222,80 | 222,40 | 222,18 | 222,10 | kg/t cana |
| Vapor vivo gerado                | 562,95 | 569,30         | 596,09 | 614,31 | 623,04 | 632,64 | 637,44 | 643,25 | 647,68 | kg/t cana |
| Razão vapor/bagaço               | 2,34   | 2,51           | 2,65   | 2,74   | 2,79   | 2,84   | 2,87   | 2,89   | 2,92   |           |

A produção específica de vapor, para a simulação realizada nesse sistema, variou de 2,34 até 2,92. O sistema gerou mais vapor por unidade de bagaço consumido com cada regenerador instalado, passando de 562,95 para 647,68 kg de vapor por tonelada de cana processada, o seja até 15,05% a mais.

A Figura 4.10 apresenta a variação percentual no excedente de bagaço no Grupo II em função do número de regeneradores instalados. O ciclo com só um regenerador consegue excedentes de biomassa de 5,62% já com oito regeneradores o excedente de bagaço obtido passa a 7,76%.

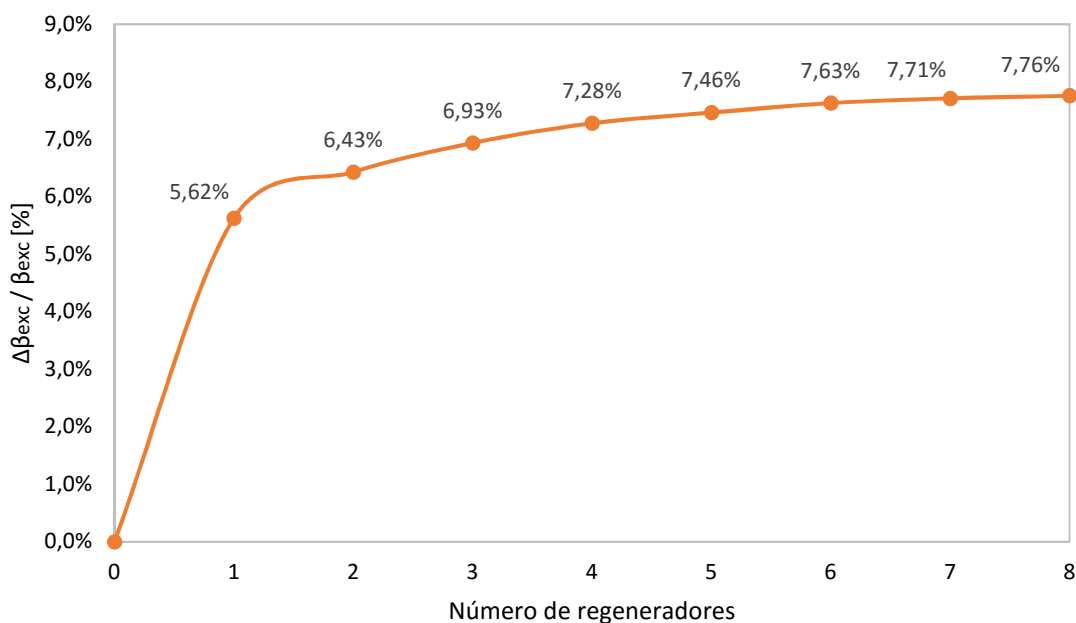


Figura 4.10 – Comparação da variação percentual no excedente de bagaço entre o sistema com reaquecimento e regeneração (C3) e o cenário base (C0), no Grupo II



Na Figura 4.11 pode-se apreciar o efeito individual que tem cada regenerador na geração de bagaço excedente. O comportamento é similar ao cenário 2, a introdução de um primeiro regenerador aumenta o excedente de bagaço em 5,62%. Um segundo regenerador aumenta o excedente em 0,80%. Com o terceiro trocador regenerativo o acréscimo é de 0,51%, e assim o incremento descreve uma tendência de diminuição conforme aumenta o número de regeneradores.

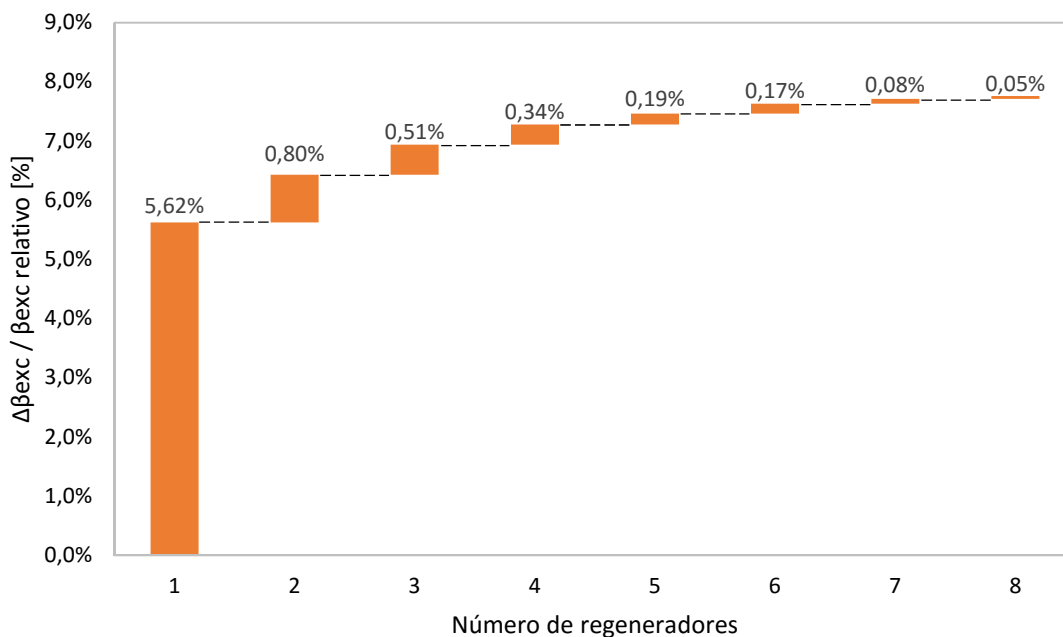


Figura 4.11 – Variação percentual no excedente de bagaço para o sistema com reaquecimento e regeneração no Grupo II

A Figura 4.12 mostra o comportamento crescente da eficiência exergética. É importante notar que se obtém maior ganho tanto na eficiência exergética quanto na geração de bagaço excedente com utilização de reaquecimento e regeneração simultânea, mas o incremento não corresponde a soma dos ganhos já obtidos nos cenários 1 e 2. O efeito combinado das duas melhorias aplicadas ao ciclo é levemente inferior do que a soma quando implementados independentemente.

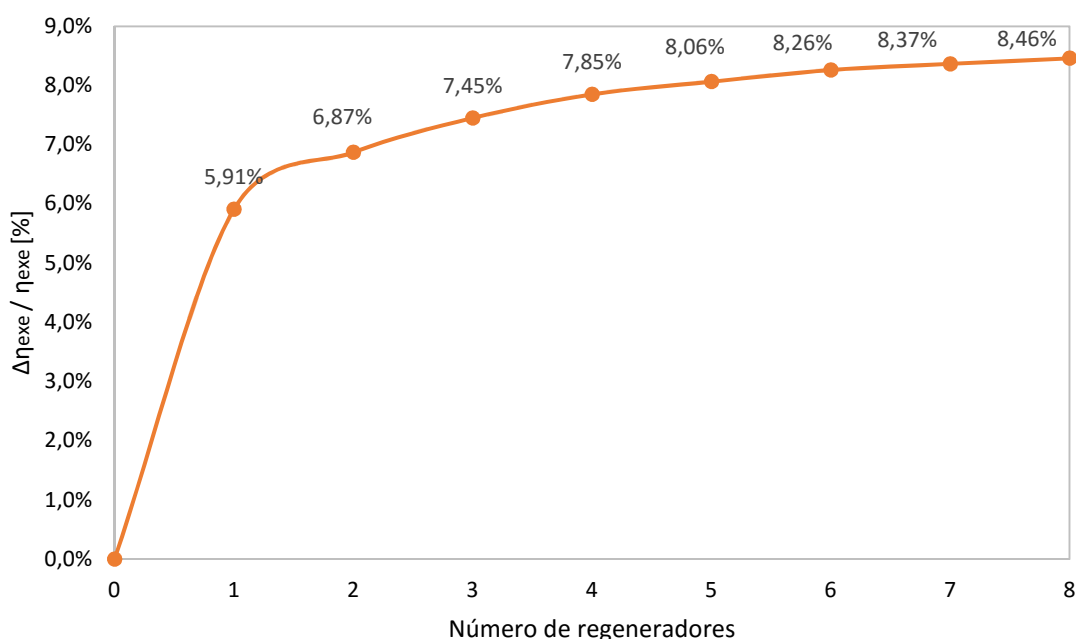


Figura 4.12 – Comparação da variação percentual na eficiência exérgica entre o sistema com reaquecimento e regeneração (C3) e o caso base (C0) no Grupo II

O ciclo com apenas um regenerador consegue ganhos na eficiência exérgica de até 5,91%. Com oito regeneradores a eficiência exérgica obtida é da ordem de 8,46%.

Tabela 4.12 – Resultados para o bagaço excedente e a eficiência exérgica no Cenário com reaquecimento e regeneração (C3), com relação ao Cenário Base (C0) para o Grupo II

|                         |       | Grupo II |       |       |       |       |       |       |       |   |
|-------------------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
|                         | C0    | C3       |       |       |       |       |       |       |       |   |
| Número de regeneradores |       | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |   |
| Bagaço excedente        | 0     | 5,62     | 6,43  | 6,93  | 7,28  | 7,46  | 7,63  | 7,71  | 7,76  | % |
| Eficiência exérgica     | 25,54 | 27,05    | 27,30 | 27,45 | 27,55 | 27,60 | 27,65 | 27,68 | 27,70 | % |

Bagaço excedente em relação ao bagaço consumido no ciclo convencional

Quando analisado o bagaço excedente no Cenário com Reaquecimento e Regeneração (C3), em relação ao Cenário Base (C0), se conseguem acréscimos na faixa de 5,62 a 7,76%. No entanto, quando se compara o bagaço excedente com relação ao bagaço total disponível, os incrementos se tornam maiores, na faixa de 9,83 a 11,87%, entretanto a eficiência apresenta um aumento na faixa de 1,54 a 2,16 pontos percentuais.

## 4.4. Comparação dos cenários avaliados

### 4.4.1. Bagaço Excedente no Grupo I

Da simulação do cenário base (C0) foi obtido que a quantidade de bagaço excedente para esta configuração é de 55.068 t/safra.

Para determinar em quanto é possível incrementar a quantidade de bagaço obtida em relação ao caso base, a Figura 4.15 apresenta uma comparação entre os diferentes cenários.

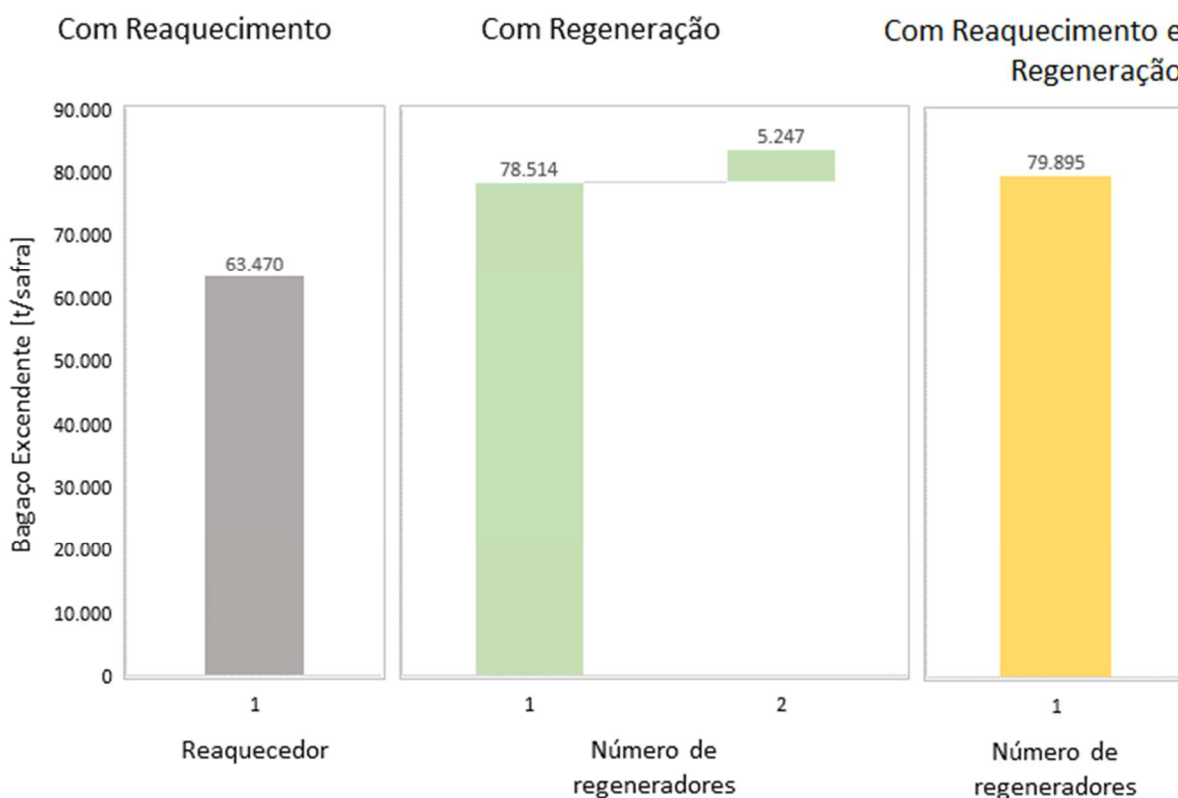


Figura 4.13 – Bagaço excedente com relação ao caso base em toneladas por safra no Grupo I

A partir dos resultados obtidos é possível realizar as seguintes considerações:

- Incorporar uma etapa de reaquecimento ao ciclo de cogeração (C1) permite obter 8.403 toneladas de bagaço excedente por safra na planta, o que corresponde a um incremento de 15,26 % com relação a C0.

- A incorporação de 1 até 2 regeneradores (C2) permite incrementar os excedentes de bagaço na faixa de 42,58 – 52,10 %, isto representa quantidades de 78.514 até 83.760 toneladas.
- A incorporação de uma etapa de reaquecimento e de um regenerador (C3) permite incrementar o bagaço excedente em 45,09% isto corresponde a 79.895 toneladas por safra.

#### 4.4.2. Eficiência Exergética no Grupo I

Da simulação do cenário base (C0) foi obtido que a eficiência exergética para esta configuração é de 25,80%.

A Figura 4.16 apresenta uma comparação entre os diferentes cenários, indicando o incremento na eficiência exergética em relação ao caso base.

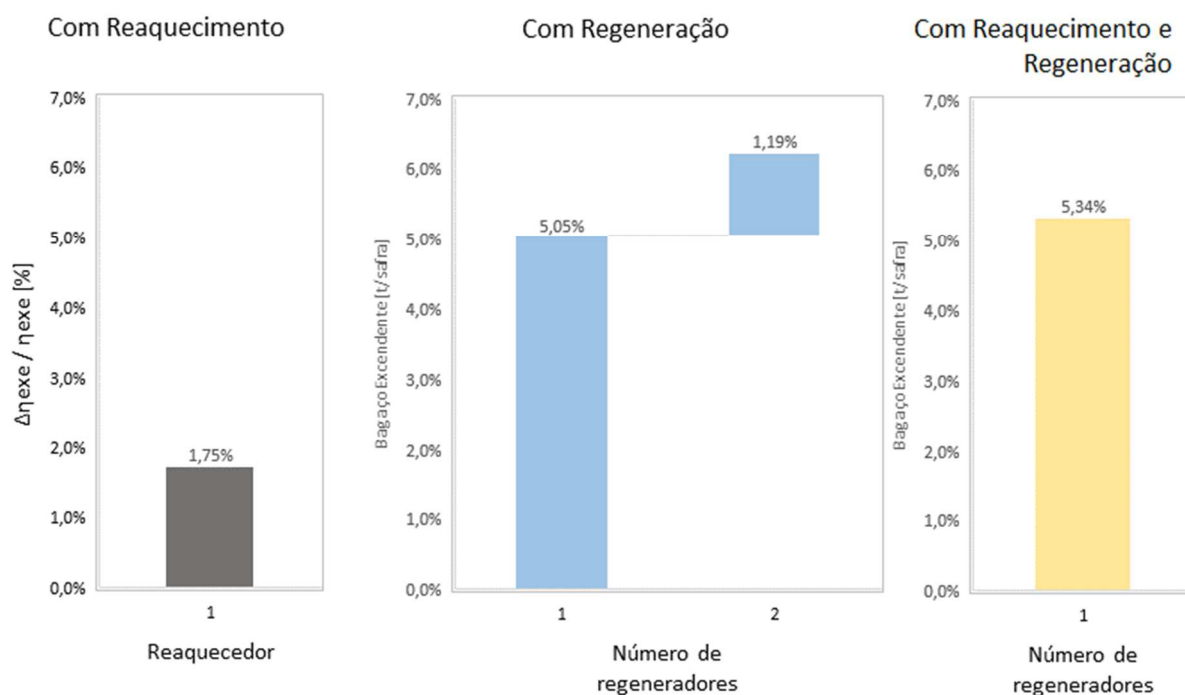


Figura 4.14 – Incremento na eficiência exergética com relação ao caso base no Grupo I

A partir dos resultados obtidos é possível realizar as seguintes considerações:

- A incorporação de uma etapa de reaquecimento ao ciclo de cogeração (C1) aumenta a eficiência exergética a 26,25%, o que corresponde a um incremento de 1,75% com relação a C0.

- A incorporação de 1 até 2 regeneradores (C2) permite obter eficiências exergéticas na faixa de 27,10% - 27,40%, isto representa incrementos percentuais de 5,05 a 6,23%.
- A incorporação de uma etapa de reaquecimento e um regenerador (C3) permite obter uma eficiência exergética de 27,17% isto corresponde a um incremento de 5,34%.

#### 4.4.3. Bagaço Excedente no Grupo II

Da simulação do cenário base (C0) foi obtido que a quantidade de bagaço excedente para esta configuração é de 24.259 t/safra.

Para determinar em quanto é possível incrementar a quantidade de bagaço obtida em relação ao caso base, a Figura 4.15 apresenta uma comparação entre os diferentes cenários.

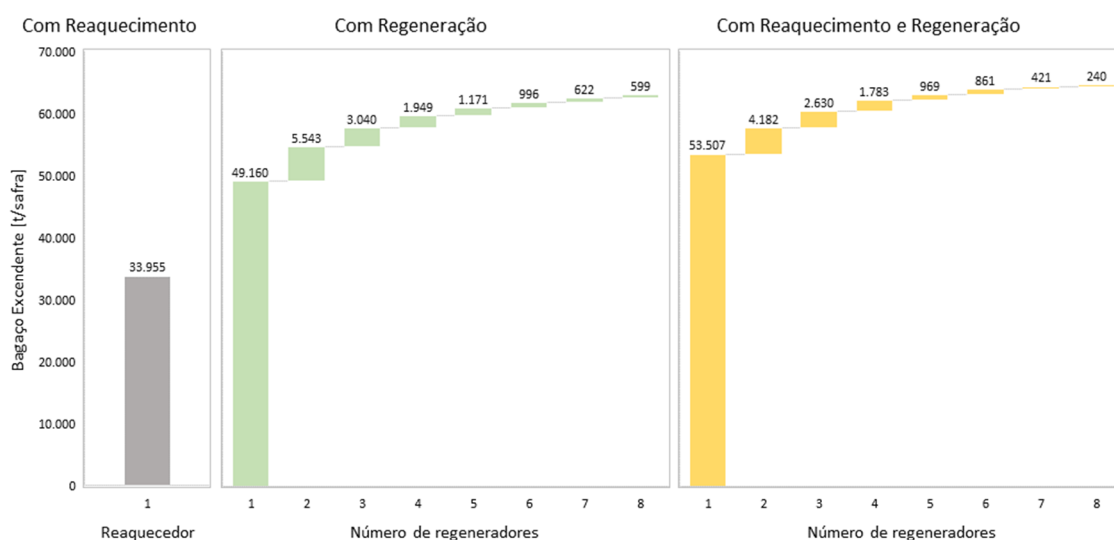


Figura 4.15 – Bagaço excedente com relação ao caso base em toneladas por safra no Grupo II

A partir dos resultados obtidos é possível realizar as seguintes considerações:

- Incorporar uma etapa de reaquecimento ao ciclo de cogeração (C1) permite obter 9.697 toneladas de bagaço excedente por safra na planta, o que corresponde a um incremento de 39,97 % com relação a C0.
- A incorporação de 1 até 8 regeneradores (C2) permite incrementar os excedentes de bagaço na faixa de 102,65 – 160,03 %, isto representa quantidades de 24.901 até 38.821 toneladas.

- A incorporação de uma etapa de reaquecimento e de 1 até 8 regeneradores (C3) permite incrementar o bagaço excedente numa faixa de 120,57 – 166,26% isto corresponde a quantidades na faixa de 29.248 a 40.334 toneladas por safra.

#### 4.4.4. Eficiência Exergética no Grupo II

Da simulação do cenário base (C0) foi obtido que a eficiência exergética para esta configuração é de 25,54%.

A Figura 4.16 apresenta uma comparação entre os diferentes cenários, indicando o incremento na eficiência exergética em relação ao caso base.

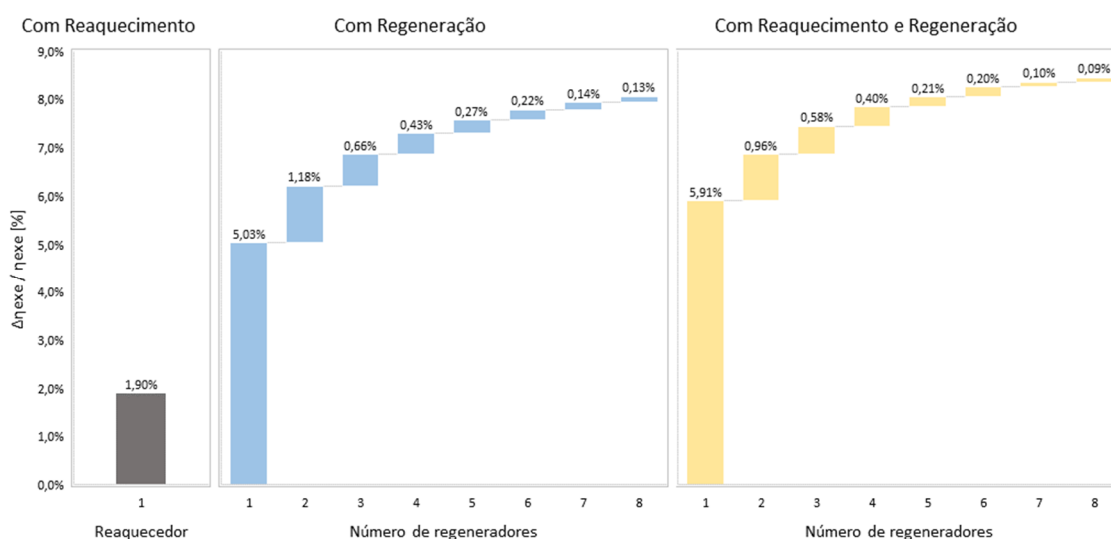


Figura 4.16 – Incremento na eficiência exergética com relação ao caso base no Grupo II

A partir dos resultados obtidos é possível realizar as seguintes considerações:

- A incorporação de uma etapa de reaquecimento ao ciclo de cogeração (C1) aumenta a eficiência exergética a 26,03%, o que corresponde a um incremento de 1,90% com relação a C0.
- A incorporação de 1 até 8 regeneradores (C2) permite obter eficiências exergéticas na faixa de 26,83% - 27,60%, isto representa incrementos percentuais de 5,03 a 8,07%.
- A incorporação de uma etapa de reaquecimento e de 1 até 8 regeneradores (C3) permite obter eficiências exergéticas numa faixa de 27,05 – 27,70% isto corresponde a incrementos percentuais na faixa de 5,91 a 8,46%.

A continuação é estimado o potencial de geração de energia elétrica excedente adicional durante o período de entressafra e de produção de etanol de 2da geração a partir do bagaço excedente obtido.

#### **4.5. Energia Elétrica Excedente Adicional durante a entressafra**

Nos períodos de entressafra de cana de açúcar, o bagaço não se encontra disponível em quantidades suficientes para seu aproveitamento na geração termelétrica, tornando a infraestrutura sucroalcooleira de geração de energia elétrica ociosa.

Nesse sentido o potencial de economia de bagaço a partir da incorporação das alternativas de melhoras baseadas no reaquecimento e regeneração possibilitam a utilização do bagaço excedente na usina apenas para geração de energia elétrica durante a entressafra.

A entressafra provoca modificações nas condições de operação da usina. Durante esse período não há produção de açúcar e álcool, portanto os equipamentos para o processamento da cana param. A demanda de energia térmica (consumo de vapor) e elétrica (acionamento de moendas) das diferentes etapas de produção de açúcar e etanol são zero, dessa forma, a única demanda de energia existente é do próprio sistema de geração termelétrico.

Com as considerações antes mencionadas e conservando a mesma potência instalada, foi estimado o potencial de geração de eletricidade excedente a partir do bagaço excedente obtido com as alternativas de melhoras consideradas. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.17 e 4.18 para os Grupos I e II, respectivamente.

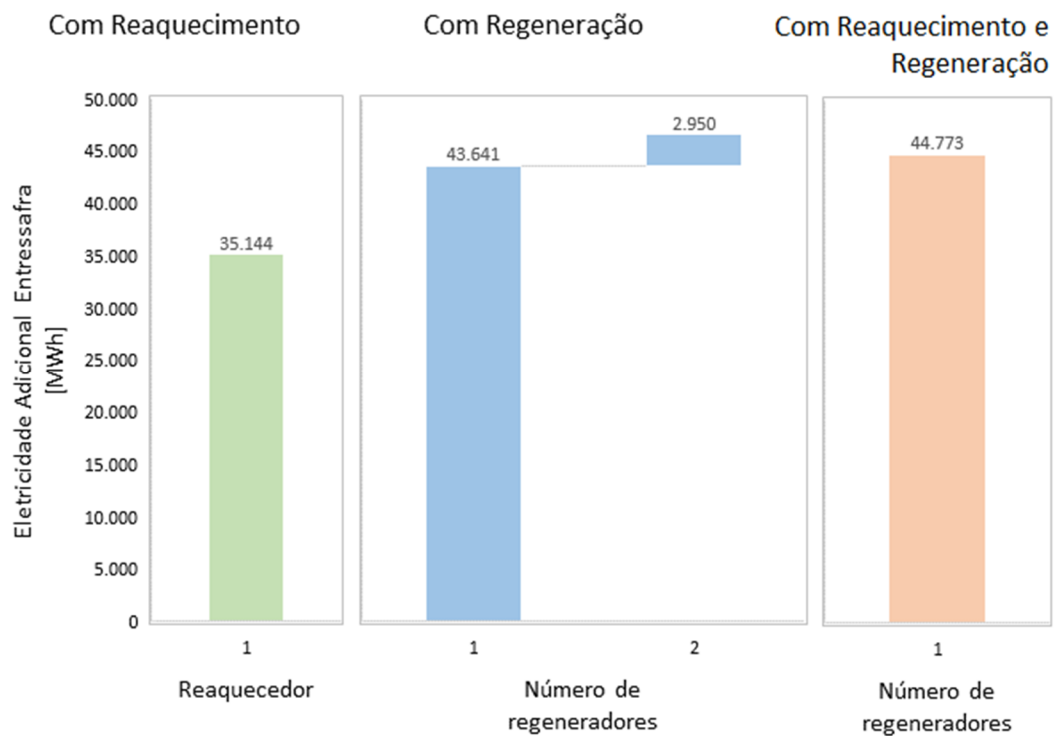


Figura 4.17 – Potencial de geração de eletricidade durante a entressafra em MWh, Grupo I

Com relação ao ciclo base é possível considerar:

- Com a incorporação de uma etapa de reaquecimento no ciclo (C1) o potencial de geração de energia elétrica excedente é de 35.144 MWh durante a entressafra.
- Com a incorporação de 1 até 2 regeneradores ao ciclo de cogeração (C2) o potencial de produção de energia elétrica está na faixa de 43.641 – 46.591 MWh durante a entressafra.
- Com a economia de combustível conseguida no cenário (C3) é possível gerar 44773 MWh durante a entressafra.



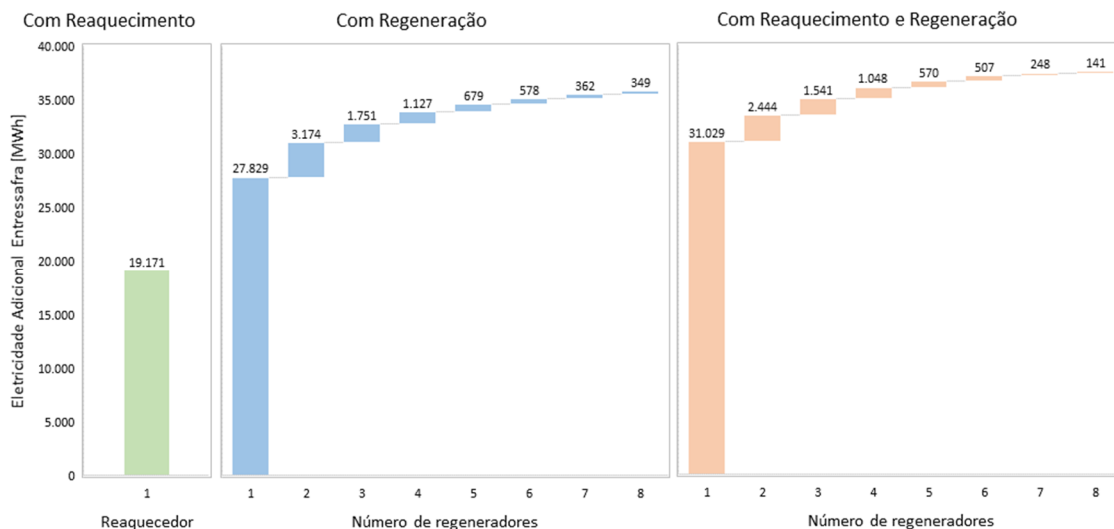


Figura 4.18 – Potencial de geração de eletricidade durante a entressafra em MWh, Grupo II

Com relação ao ciclo base é possível considerar:

- Com a incorporação de uma etapa de reaquecimento no ciclo (C1) o potencial de geração de energia elétrica excedente é de 19.171 MWh durante a entressafra.
- Com a incorporação de 1 até 8 regeneradores ao ciclo de cogeração (C2) o potencial de produção de energia elétrica está na faixa de 27.829 – 36.741 MWh durante a entressafra.
- Com a economia de combustível conseguida no cenário (C3) é possível gerar na faixa de 31.029 - 38.072 MWh durante a entressafra.

Além do potencial na produção de energia elétrica entressafra, o excedente de bagaço tem o potencial de ser transformado em etanol de segunda geração (E2G ou etanol lignocelulósico), constituindo-se em uma opção complementar à produção tradicional de etanol, sem exigir um incremento proporcional das áreas de plantio.

As matérias-primas de natureza ligno-celulósica remanescentes após corte, colheita e processamento de cana para obtenção de açúcar e etanol apresentam grande potencial para seu emprego na obtenção de etanol através da hidrólise das mesmas a uma mistura de açúcares redutores e posterior fermentação e recuperação do etanol por destilação (NOVACANA, 2016).

#### 4.6. Potencial de incremento na produção de etanol pela adição de uma planta de 2ª geração

Para quantificar o potencial de produção de etanol de segunda geração em função do bagaço excedente obtido com as alternativas de melhoras analisadas, considerou-se a produtividade de 117 litros de álcool lignocelulósico por tonelada de bagaço (OJEDA; SÁNCHEZ; KAFAROV, 2011). A partir deste valor de rendimento e considerando o bagaço excedente calculado na secção anterior, é estimado o potencial de produção de etanol anidro pela adição de uma planta de segunda geração em litros por safra.

O potencial calculado não considera as quantidades de energia térmica e eletromecânica requeridas para o funcionamento da planta. Os principais resultados são apresentados nas Figuras 4.19 e 4.20, para os Grupos I e II, respectivamente.

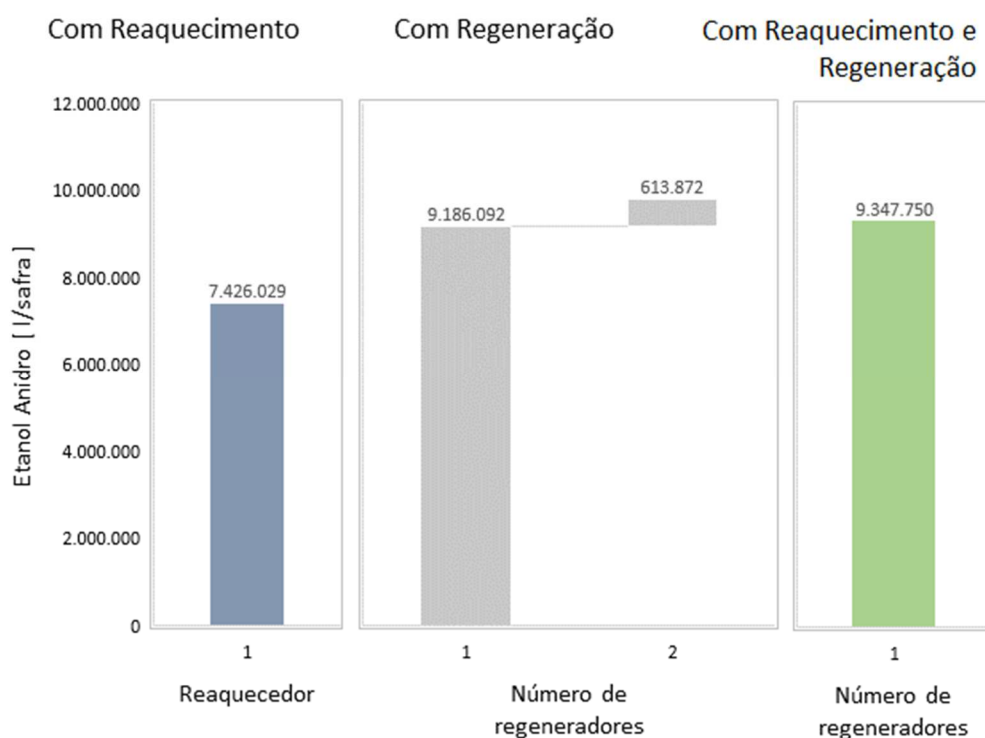


Figura 4.19 – Potencial de incremento na produção de etanol anidro pela adição de uma planta de 2ª geração em litros por safra, Grupo I

Com relação ao cenário base (C0) é possível realizar as seguintes considerações:

- O excedente de bagaço gerado a partir da incorporação de uma etapa de reaquecimento (C1) permitiria produzir 7.426.029 litros de etanol adicionais por

safra, o que representa um incremento de 8,19% com relação ao total de álcool de primeira geração (1G), produzido durante o mesmo período.

- Com a incorporação de 1 até 2 regeneradores (C2) ao ciclo, o potencial de produção de E2G apresenta um incremento na de faixa de 10,13 - 10,80% com relação à produção de E1G por safra. Com a utilização de regeneração o potencial de produção de E2G está na faixa de 9.186.092 a 9.799.964 litros por safra.
- O uso de reaquecimento e regeneração simultâneo (C3) permitiria incrementar em 10,30% a produção de etanol da planta, isto corresponde a 9.347.750 litros por safra quando se incorporam reaquecimento e um regenerador.

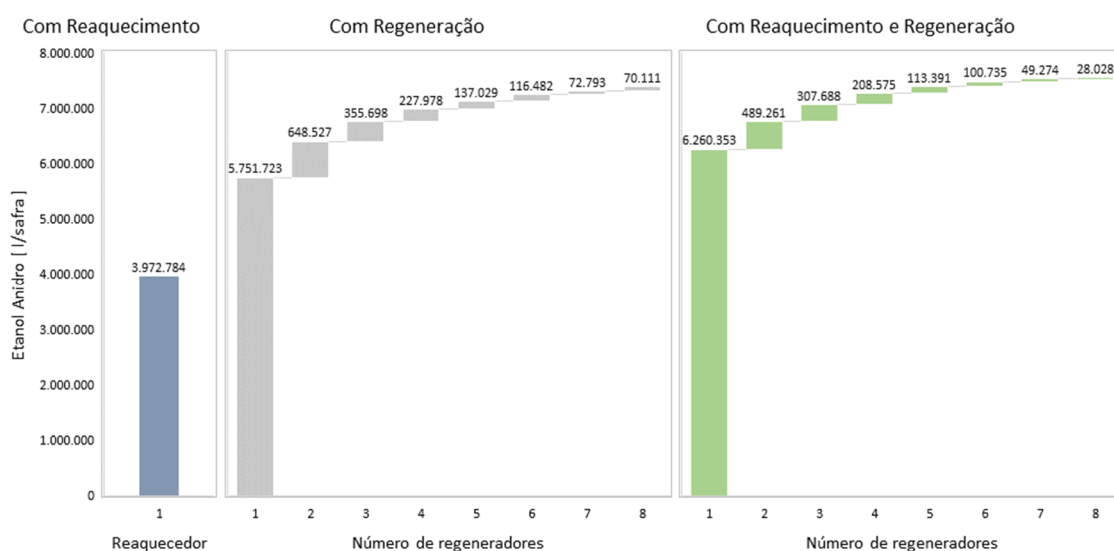


Figura 4.20 – Potencial de incremento na produção de etanol anidro pela adição de uma planta de 2ª geração em litros por safra, Grupo II

Com relação ao cenário base (C0) é possível realizar as seguintes considerações:

- O excedente de bagaço gerado a partir da incorporação de uma etapa de reaquecimento (C1) permitiria produzir 3.972.784 litros de etanol adicionais por safra, o que representa um incremento de 4,38% com relação ao total de álcool de primeira geração (1G), produzido durante o mesmo período.
- Com a incorporação de 1 até 8 regeneradores (C2) ao ciclo, o potencial de produção de E2G apresenta um incremento na de faixa de 6,34 - 8,14% com

relação à produção de E1G por safra. Com a utilização de regeneração o potencial de produção de E2G está na faixa de 5.751.723 a 7.380.341 litros por safra.

- O uso de reaquecimento e regeneração simultâneo (C3) permitiria incrementar na faixa de 6,90 – 8,33% a produção de etanol da planta, isto corresponde a quantidades na faixa de 6.260.353 a 7.557.305 litros por safra quando se incorporam de 1 até 8 regeneradores.

## 5. ANÁLISE EXERGÉTICA

A fim de terminar quais são os equipamentos que mais contribuem para a destruição de exergia nos sistemas de cogeração foi realizada uma análise exergetica em cada um dos componentes da planta para os diferentes cenários avaliados.

### 5.1. Exergia

A exergia é definida como o trabalho máximo que pode ser obtido a partir da interação de um sistema com o meio ambiente (MORAN e SHAPIRO, 2011). Este conceito se baseia na combinação da Primeira e Segunda Lei da termodinâmica, considerando o aumento de entropia como resultado da interação do ciclo termodinâmico com o ambiente, causando a degradação da energia devido às irreversibilidades.

Neste trabalho, a pressão de referência ( $P_0$ ) é de uma atmosfera (101,325 kPa) e temperatura de referência ( $T_0$ ) de 25 °C. Se considera que as propriedades intensivas do ambiente não mudam de forma significativa com a interação de qualquer processo em questão, permanecendo assim, um ambiente de referência sem irreversibilidades.

Quando um sistema de interesse está em  $T_0$  e  $P_0$ , ou seja, em equilíbrio com relação ao meio ambiente, se diz que o sistema está em estado morto. No estado morto não existe interação entre o sistema e ambiente, portanto, não existe potencial para o desenvolvimento de trabalho.

#### 5.1.1. Exergia destruída

Como a energia, a exergia pode ser transferida através da fronteira de um volume de controle em regime permanente. A mudança na exergia de um sistema pode não ser igual ao total de exergia transferida ao sistema por causa das irreversibilidades e perdas. Os conceitos de mudança, transferência e destruição de exergia, estão relacionados ao balanço de exergia em um volume de controle.

A seguinte expressão permite calcular a exergia destruída no volume de controle em regime permanente:

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} - \dot{E}_d \quad (5.1)$$

Onde  $e_{fe}$  é a exergia por unidade de massa entrando ao volume de controle,  $e_{fs}$  a exergia por unidade de massa saindo do volume de controle,  $e_f$  é denominado fluxo de exergia específico e é definido pela seguinte equação:

$$e_f = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (5.2)$$

Onde  $h$  e  $s$  representam a entalpia e a entropia específica, respectivamente;  $h_0$  e  $s_0$  representam os respectivos valores dessas propriedades avaliadas em  $T_0$  e  $P_0$ .

A metodologia a seguir permite calcular a exergia destruída em cada equipamento do sistema de cogeração:

#### 5.1.1.1. Exergia destruída na caldeira

No balanço exergético na caldeira, além de participar a exergia de entrada da água de alimentação e a exergia de saída do vapor vivo, participa também a exergia dos combustíveis (bagaço e palha).

Nos cálculos foi utilizada a exergia específica do bagaço apresentada por Szargut, Morris e Steward (1988), 9842 kJ/kg, que leva em conta a correlação entre a exergia química e o poder calorífico inferior do combustível, considerando a relação entre as frações em massa de oxigênio e carbono, a composição elementar do combustível, e o conteúdo de umidade. A exergia específica da palha utilizada foi a calculada no trabalho de Passolongo (2011), 15121 kJ/kg.

A exergia destruída na caldeira se dá pela equação (5.3):

$$\dot{E}_{d_{cald}} = \dot{m}_{comb}e_{f_{comb}} + \dot{m}_e e_{fe} - \dot{m}_s e_{fs} \quad [MW] \quad (5.3)$$

Quando é aplicado reaquecimento a equação para calcular a exergia destruída inclui as exergias de entrada para reaquecimento e saída do vapor reaquecido, assim:

$$\dot{E}_{d_{cald}} = \dot{m}_{comb}e_{f_{comb}} + \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} \quad [MW] \quad (5.4)$$

#### 5.1.1.2. Exergia destruída no turbo-gerador

A exergia destruída na turbina se dá pela equação (5.5):

$$\dot{E}_{d_{turb}} = -\dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e e_{fe} + \sum_e \dot{m}_{extr} e_{f_{extr}} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} \quad [MW] \quad (5.5)$$

#### 5.1.1.3. Exergia destruída no condensador

A exergia dissipada no condensador leva em conta o fluxo de água de resfriamento e se dá pela equação (5.6):

$$\dot{E}_{d_{cond}} = \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} \quad [MW] \quad (5.6)$$

#### 5.1.1.4. Exergia destruída nas bombas

A exergia destruída nas bombas se dá pela equação (5.7):

$$\dot{E}_{d_{bomb}} = \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} \quad [MW] \quad (5.7)$$

#### 5.1.1.5. Exergia destruída no desaerador

A exergia dissipada no desaerador se dá pela equação (5.8):

$$\dot{E}_{d_{des}} = \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} \quad [MW] \quad (5.8)$$

#### 5.1.1.6. Exergia destruída nos regeneradores

A exergia dissipada nos regeneradores se dá pela equação (5.9):

$$E_{d_{regen}} = \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} \quad [MW] \quad (5.9)$$

## 5.2. Resultados da análise exérgica

A partir das simulações realizadas com o software GateCycle™ foram obtidos os parâmetros de pressão e temperatura para cada fluxo do sistema de cogeração. A entalpia e entropia de cada corrente foi calculada com o suplemento de Microsoft Excel™, CoolProp™, uma biblioteca de propriedades termodinâmicas de código aberto, disponível para a maioria das linguagens de programação e plataformas de interesse técnico (BELL *et al.*, 2014).

Uma vez tabelados os parâmetros de pressão, temperatura, entalpia e entropia, foi possível calcular a exergia destruída em cada equipamento e a exergia total destruída no sistema de

cogeração, bem como o aproveitamento da exergia disponível em forma de vapor (para processo) e eletricidade (para processo e excedente).

### 5.2.1. Ciclo de cogeração convencional (C0)

As representações gráficas dos fluxos de exergia dos diferentes esquemas de cogeração propostos, foram construídas utilizando-se o software e!Sankey® 4.0 na versão de avaliação, disponível no website [www.e-sankey.com](http://www.e-sankey.com).

A Figura 5.1 apresenta o diagrama de Grassmann com os fluxos de exergia do ciclo de cogeração convencional. O valor do fluxo exergetico fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 362,2 MW.

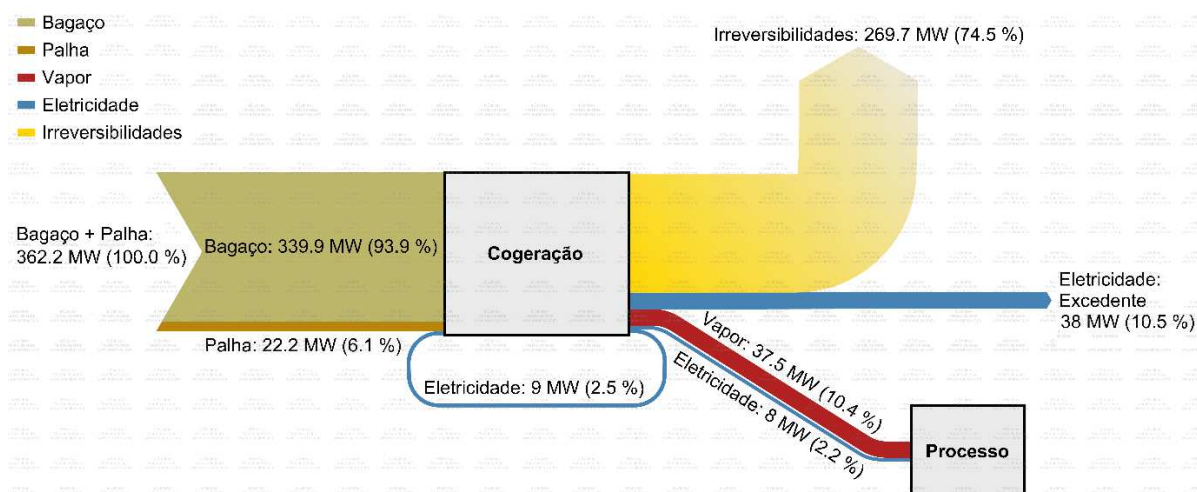


Figura 5.1 – Diagrama de Grassmann para o ciclo convencional

A Figura 5.2 permite também visualizar a distribuição da exergia no ciclo de cogeração convencional.

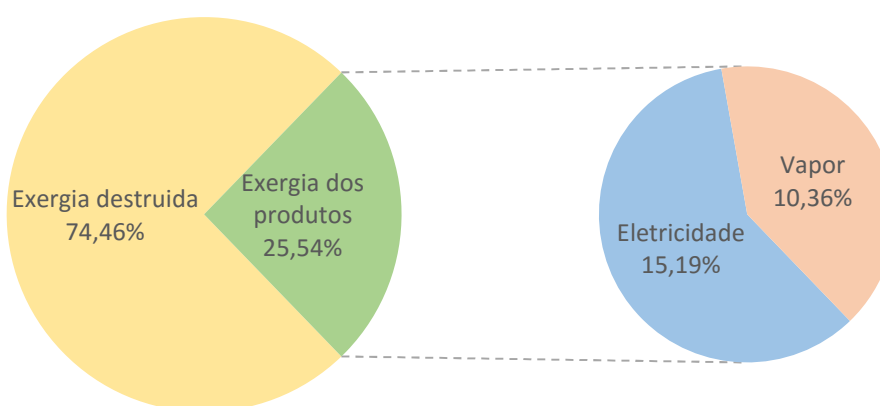


Figura 5.2 – Distribuição da exergia para o ciclo convencional



Observa-se na Figura 5.2 que 74,46% da exergia é destruída devido às irreversibilidades do sistema de cogeração. A eletricidade produzida compreende 15,19% da exergia disponível. O vapor produzido compreende 10,36% da exergia disponível, aproveitada no processo de produção de açúcar e álcool.

### 5.2.2. Ciclo de cogeração com reaquecimento (C1)

A Figura 5.3 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergéticos quando é incorporado um sistema de reaquecimento no ciclo de cogeração. O valor do fluxo exergético fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 355,4 MW, 1,87% menos do que o ciclo convencional. Por ser mais eficiente o ciclo de cogeração, precisa-se de menos combustível para cumprir com as demandas de vapor e eletricidade, portanto a exergia entrando ao sistema é menor.

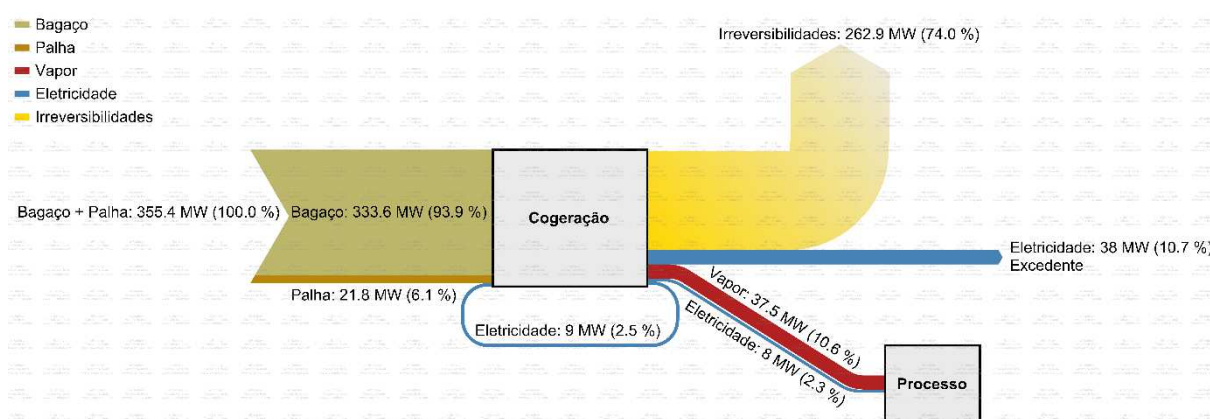


Figura 5.3 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento

A Figura 5.4 permite também a visualização do aproveitamento exergético do ciclo com reaquecimento.

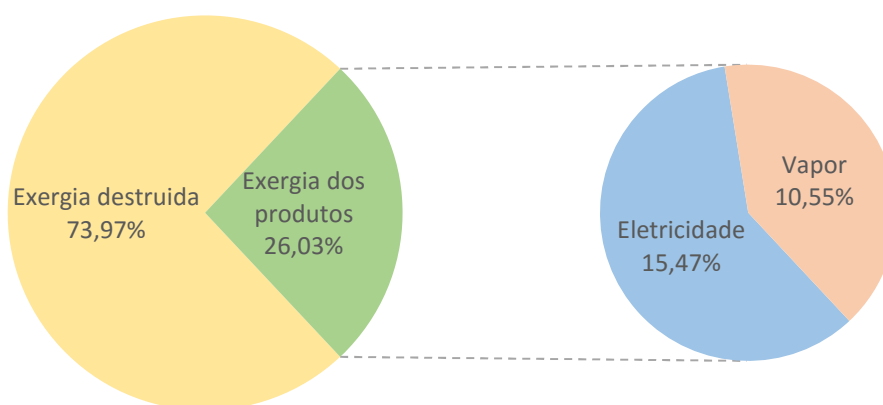


Figura 5.4 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento

Verifica-se na Figura 5.4 que com a incorporação de um sistema de aquecimento, menos exergia é destruída no sistema de cogeração, aumentando a exergia disponível em 0,5 pontos percentuais em relação ao ciclo convencional (C0). A eletricidade produzida representa 15,47% da exergia disponível. O vapor produzido compreende 10,55% da exergia disponível, aproveitada no processo.

### 5.2.3. Ciclo de cogeração regenerativo (C2)

#### 5.2.3.1. Com um regenerador

A Figura 5.5 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergéticos no ciclo regenerativo. O valor do fluxo exergético fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 344,8 MW, 2,98% menos do que o ciclo com aquecimento e 4,79% menos em comparação com o ciclo convencional, o menor fluxo exergético é atribuído à redução no fluxo de combustível.

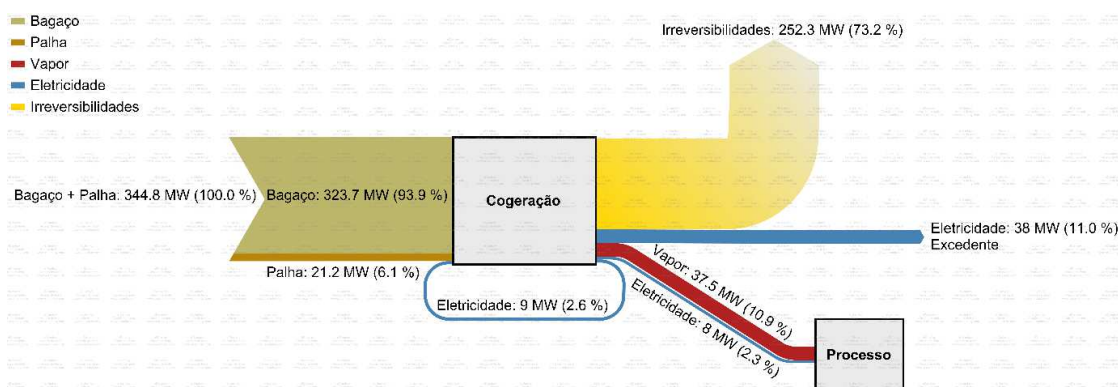


Figura 5.5 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com um regenerador

A Figura 5.6 permite também a visualização do aproveitamento exergético do ciclo de cogeração com um regenerador.

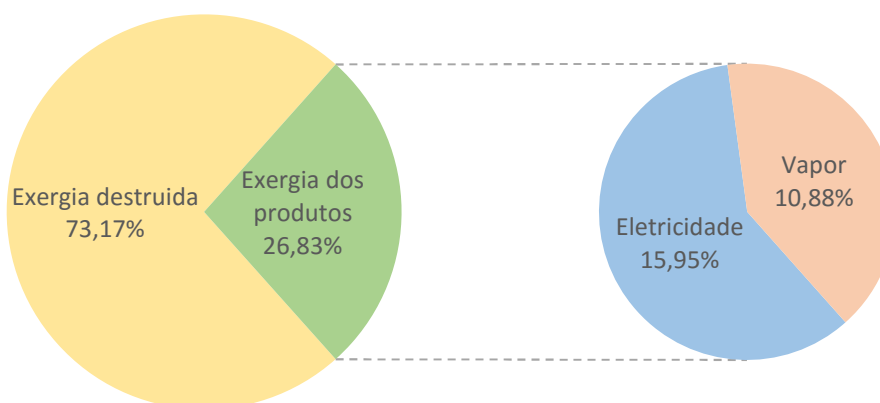


Figura 5.6 – Distribuição da exergia para o ciclo com um regenerador

Com a incorporação de um regenerador no ciclo de cogeração, obtém-se um melhor aproveitamento da exergia do bagaço e da palha, um acréscimo de 1,29 pontos percentuais em relação ao caso base (C0). Essa exergia disponível divide-se em 15,95% eletricidade e a parcela restante 10,88% que corresponde à exergia do vapor, é aproveitada no processo de fabricação de açúcar e álcool.

### 5.2.3.2. Com dois regeneradores

A Figura 5.7 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergéticos quando utilizado dois regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do segundo regenerador, o valor do fluxo exergético fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 341 MW, 1,06% menos do que o ciclo com reaquecimento (C1) e 5,85% menos em comparação com o ciclo convencional (C0).

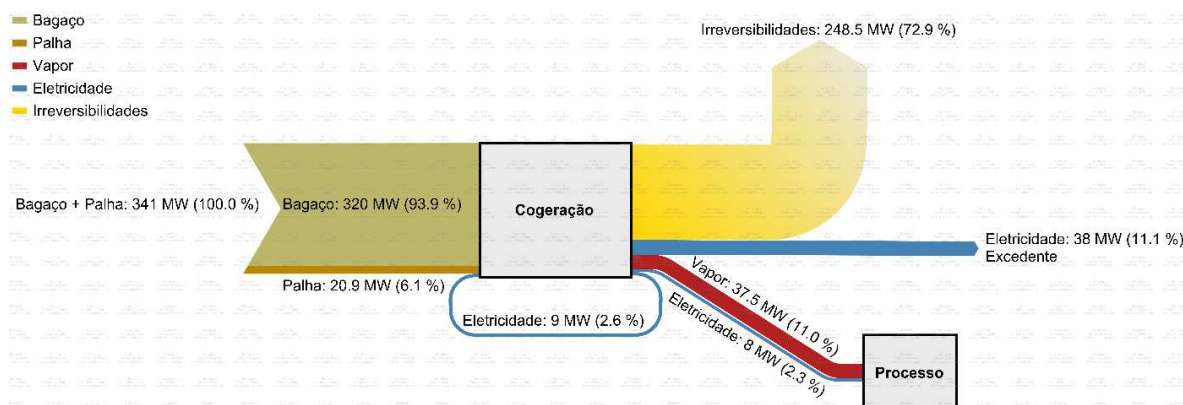


Figura 5.7 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com dois regeneradores

A Figura 5.8 permite também a visualização do aproveitamento exergético quando utilizados dois regeneradores.

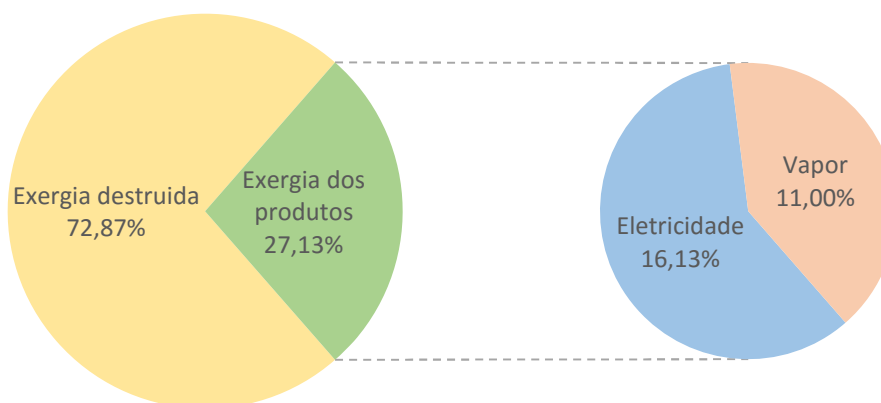


Figura 5.8 – Distribuição da exergia para o ciclo com dois regeneradores

Na Figura 5.8 tem-se que 72,87% da exergia é destruída devido às irreversibilidades do sistema de cogeração. A eletricidade produzida compreende 16,13% da exergia disponível e o vapor produzido 11,0%.

### 5.2.3.3. Com três regeneradores

A Figura 5.9 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergéticos quando utilizados três regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do terceiro regenerador, menos quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergético fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 338,8 MW, 6,43% menos em comparação com o ciclo convencional.

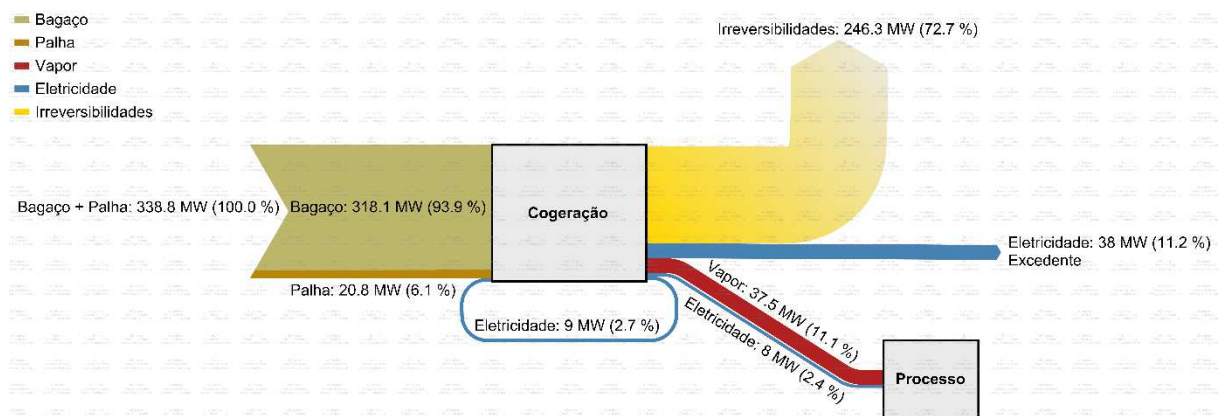


Figura 5.9 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com três regeneradores

A Figura 5.10 permite também a visualização do aproveitamento exergético quando utilizados três regeneradores.

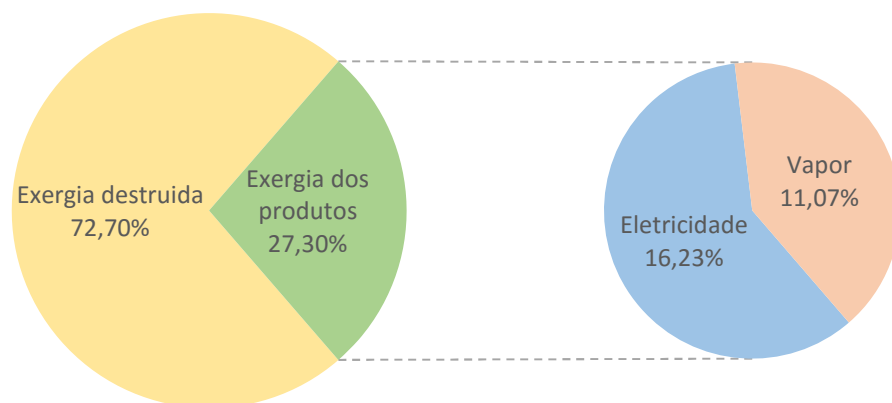


Figura 5.10 – Distribuição da exergia para o ciclo com três regeneradores

Com a adição de três regeneradores, a exergia disponível aumento em 1,76 pontos percentuais com relação ao ciclo convencional. A eletricidade produzida representa 16,23% da exergia disponível enquanto que o vapor produzido representa 11,07% dessa exergia.

#### 5.2.3.4. Com quatro regeneradores

A Figura 5.11 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergeticos quando utilizado quatro regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do quarto regenerador, menos quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração. Já o valor do fluxo exergetico fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 337,5 MW, ou seja, 6,81% menos em comparação com o ciclo convencional.

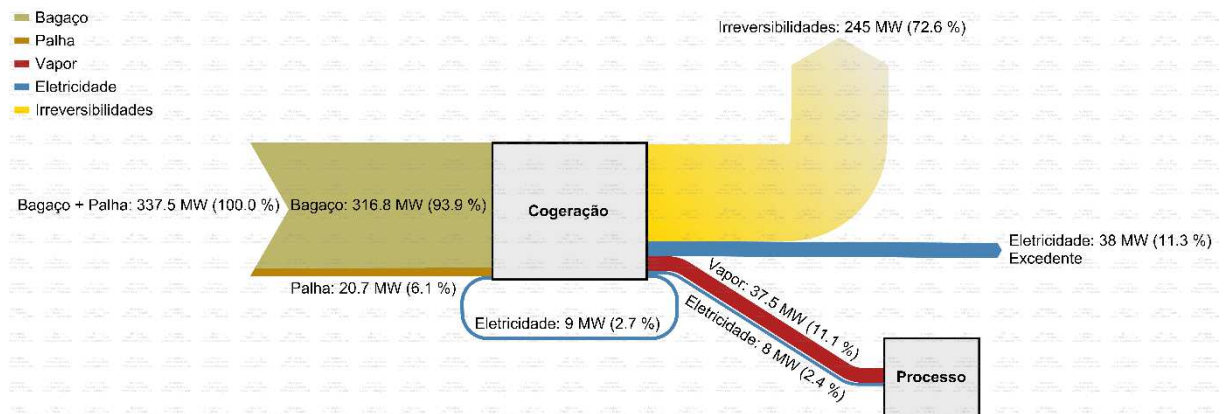


Figura 5.11 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com quatro regeneradores

A Figura 5.12 permite também a visualização do aproveitamento exergetico quando utilizados quatro regeneradores.

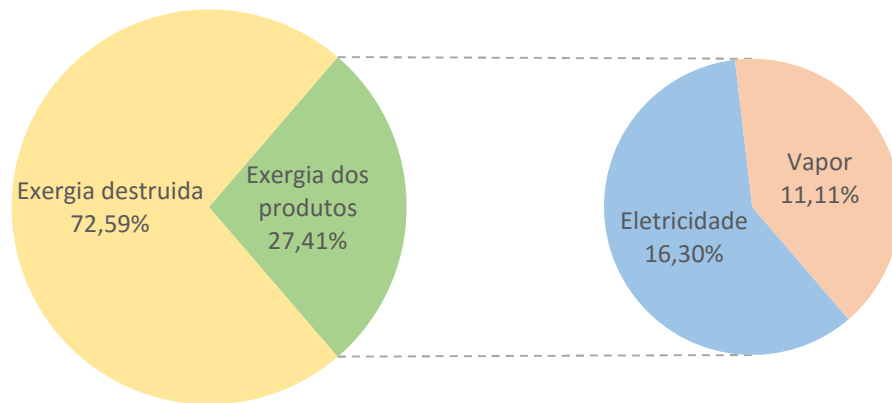


Figura 5.12 – Distribuição da exergia para o ciclo com quatro regeneradores

Observa-se na Figura 5.12 que 72,59% da exergia é destruída devido às irreversibilidades do sistema de cogeração. A eletricidade produzida compreende 16,30% da exergia disponível. O vapor produzido compreende 11,11% da exergia disponível que é aproveitada no processo de produção de açúcar e álcool.

### 5.2.3.5. Com cinco regeneradores

A Figura 5.13 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergéticos quando utilizado cinco regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do quinto regenerador, ainda é menor a quantidade de biomassa que é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergético fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 336,7 MW, ou seja, 7,05% menos em comparação com o ciclo convencional.

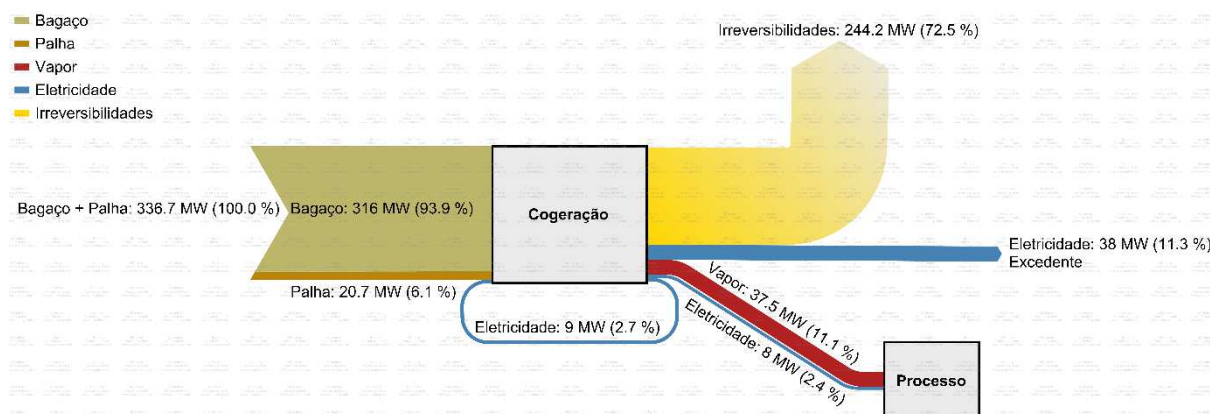


Figura 5.13 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com cinco regeneradores

A Figura 5.14 permite também a visualização do aproveitamento exergético quando utilizados cinco regeneradores.

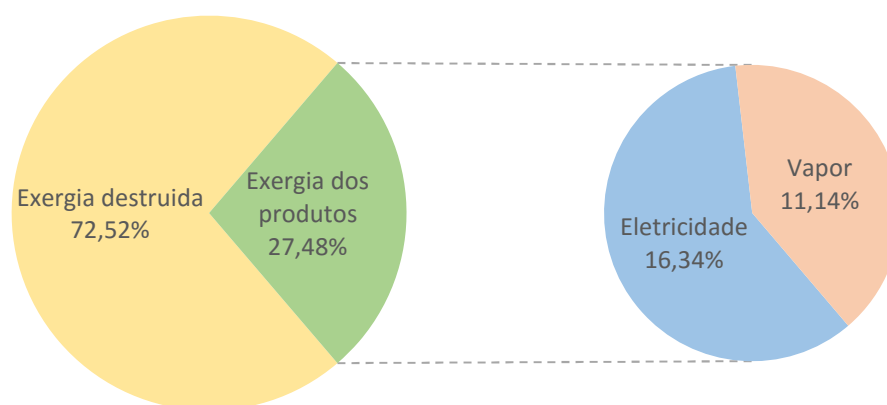


Figura 5.14 – Distribuição da exergia para o ciclo com cinco regeneradores

Verifica-se na Figura 5.14 que com a incorporação de cinco regeneradores no ciclo de cogeração, menor exergia é destruída no sistema, aumentando a exergia disponível em 1,94 pontos percentuais em relação ao ciclo convencional. A eletricidade produzida representa 16,34% da exergia disponível. O vapor produzido compreende 11,14% da exergia disponível aproveitada no processo.



### 5.2.3.6. Com seis regeneradores

A Figura 5.15 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergeticos quando utilizado seis regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do sexto regenerador, menos quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergetico fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 336 MW, 7,23% menos em comparação com o ciclo convencional.

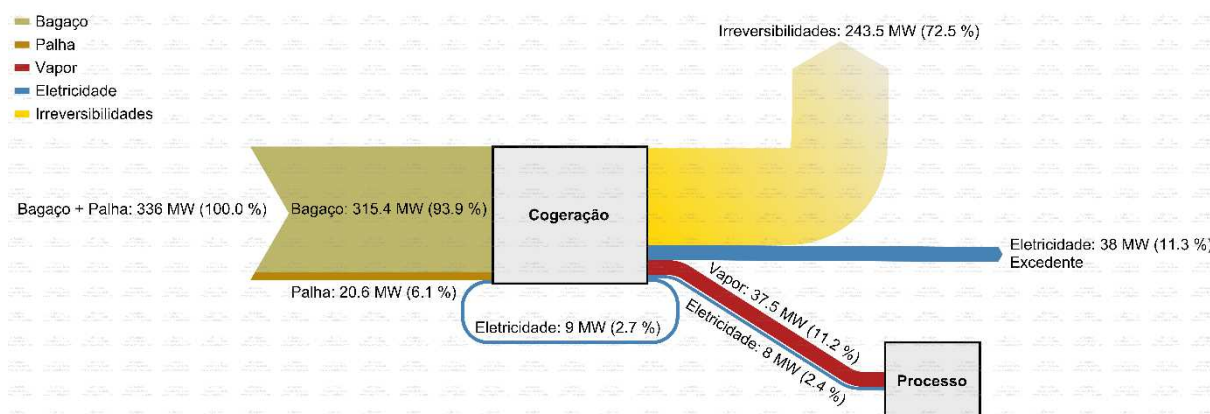


Figura 5.15 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com seis regeneradores

A Figura 5.16 permite também a visualização do aproveitamento exergetico quando utilizados seis regeneradores.

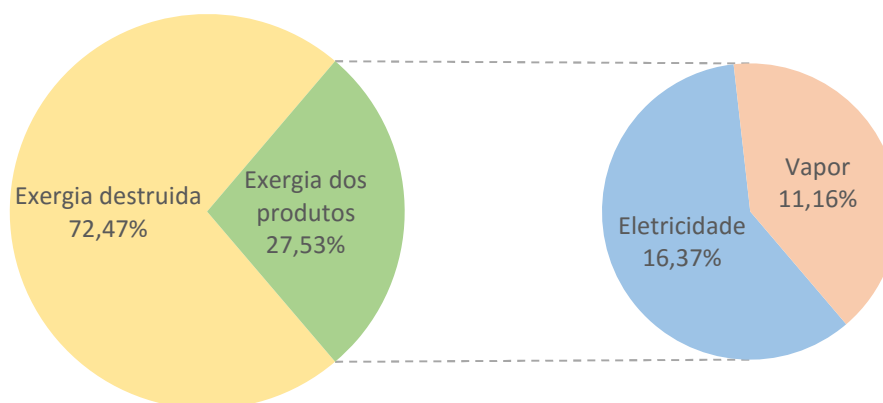


Figura 5.16 – Distribuição da exergia para o ciclo com seis regeneradores

Com a incorporação de seis regeneradores no ciclo de cogeração, adquire-se um acréscimo no aproveitamento da exergia do bagaço e da palha de 1,99 pontos percentuais em relação ao caso base. Essa exergia disponível divide-se em 16,37% eletricidade, e a parcela restante 11,16% que corresponde à exergia do vapor, esta é aproveitada no processo de fabricação de açúcar e álcool.

### 5.2.3.7. Com sete regeneradores

A Figura 5.17 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergeticos quando utilizado sete regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do sétimo regenerador, menos quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergetico fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 335,5 MW, 7,36% menos em comparação ao ciclo convencional.

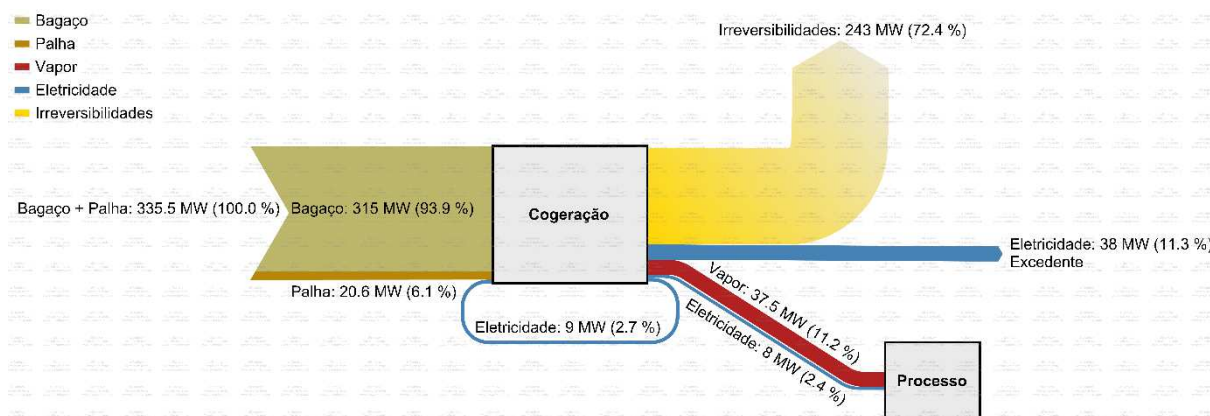


Figura 5.17 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com sete regeneradores

A Figura 5.18 permite também a visualização do aproveitamento exergetico quando utilizados sete regeneradores.

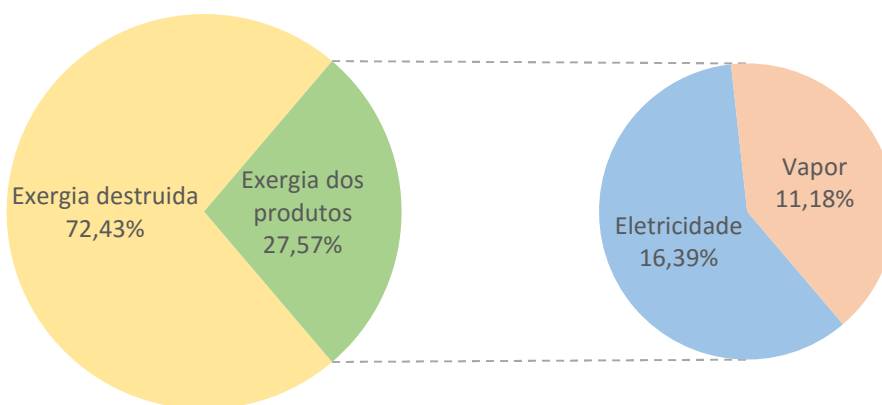


Figura 5.18 – Distribuição da exergia para o ciclo com sete regeneradores

Na Figura 5.18 tem-se que 72,43% da exergia é destruída devido às irreversibilidades do sistema de cogeração. A eletricidade produzida compreende 16,39% da exergia disponível e o vapor produzido 11,18%.

### 5.2.3.8. Com oito regeneradores

A Figura 5.19 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergeticos quando utilizado oito regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do oitavo



regenerador, ainda é menor a quantidade de biomassa que é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergético fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 335,1 MW, ou seja, 7,47% menos em comparação com o ciclo convencional.

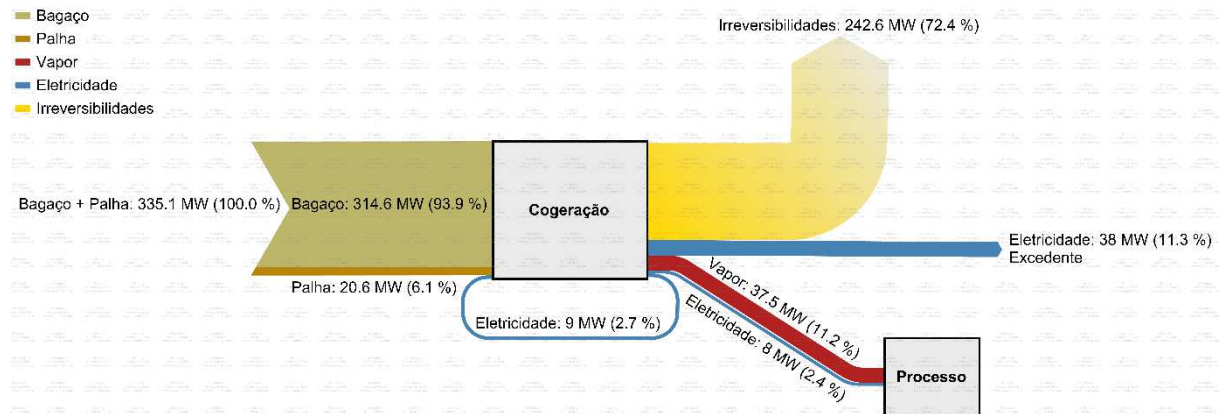


Figura 5.19 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com oito regeneradores

A Figura 5.20 permite também a visualização do aproveitamento exergético quando utilizados oito regeneradores.

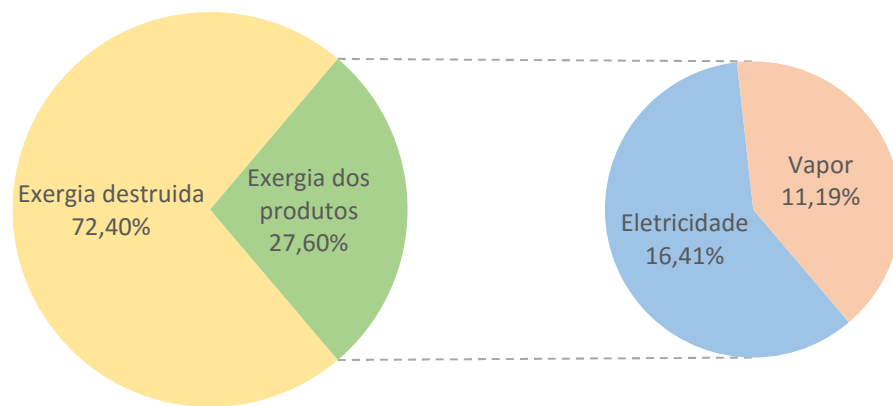


Figura 5.20 – Distribuição da exergia para o ciclo com oito regeneradores

Finalmente com a adição de oito regeneradores, a exergia disponível aumento em 2,06 pontos percentuais com relação ao ciclo convencional, atingindo então, com esta configuração, o máximo ganho de exergia disponível. A eletricidade produzida representa 16,41% da exergia disponível enquanto que o vapor produzido representa 11,19% dessa exergia.

## 5.2.4. Ciclo de cogeração com reaquecimento e regeneração (C3)

### 5.2.4.1. Reaquecimento e um regenerador

A Figura 5.21 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergéticos quando utilizados sistemas de reaquecimento e regeneração simultâneas, usando inicialmente um regenerador só. O valor de fluxo exergético fornecido pelo bagaço misturado com palha, é de 341,8 MW, o que representa 5,55% menos exergia requerida no sistema de cogeração em comparação com o ciclo convencional.

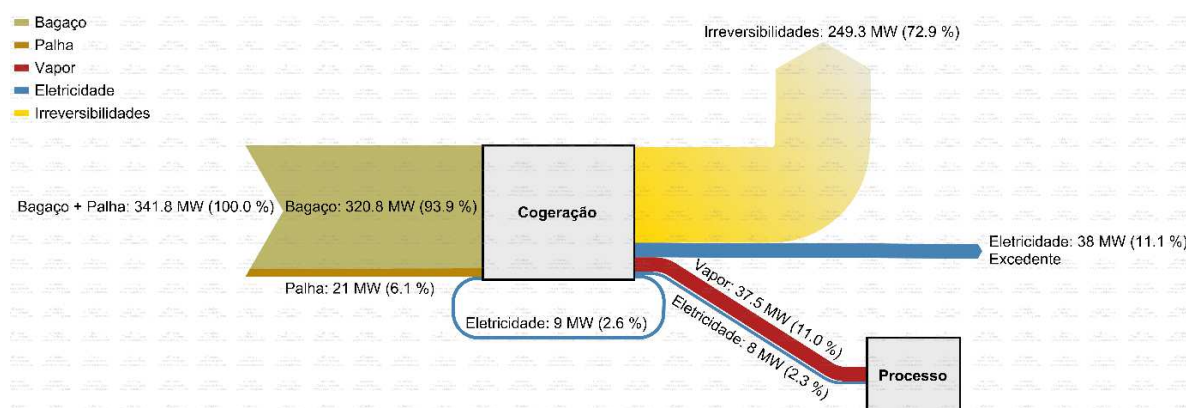


Figura 5.21 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento e um regenerador

A Figura 5.22 permite também a visualização do aproveitamento exergético quando incorporado um sistema de reaquecimento e um regenerador simultâneo no ciclo de cogeração.

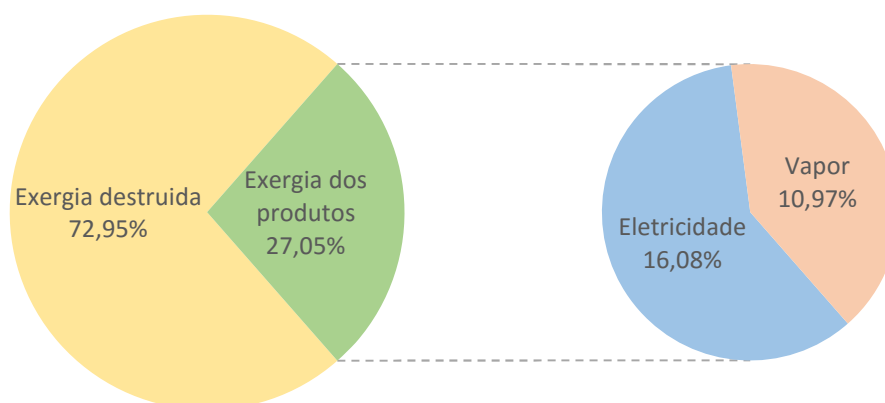


Figura 5.22 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e um regenerador

Na Figura 5.22, tem-se que 72,95% da exergia é destruída devido às irreversibilidades do sistema de cogeração. A eletricidade produzida compreende 16,08% da exergia disponível. A exergia do vapor aproveitada no processo de produção, representa 10,97% da exergia de entrada.

#### 5.2.4.2. Reaquecimento e dois regeneradores

A Figura 5.23 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergeticos quando utilizado dois regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do segundo regenerador, menos quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergetico fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 338,9 MW, 6,43% menos em comparação com o ciclo convencional.

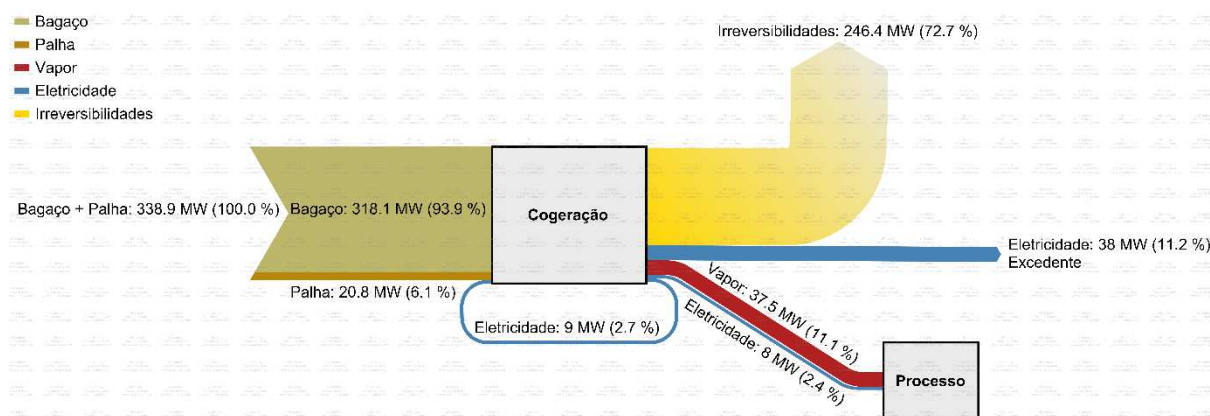


Figura 5.23 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento e dois regeneradores

A Figura 5.24 permite também a visualização do aproveitamento exergetico quando incorporado um sistema de reaquecimento e dois regeneradores simultâneo no ciclo de cogeração.

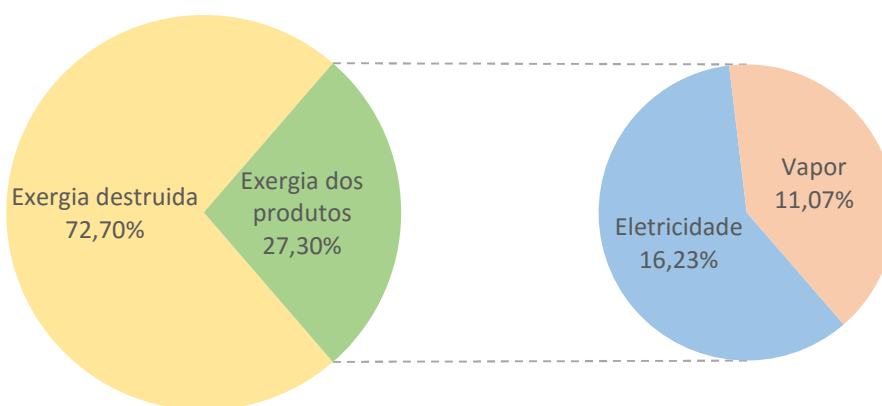


Figura 5.24 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e dois regeneradores

Na Figura 5.24 tem-se que 72,70% da exergia é destruída devido às irreversibilidades do sistema de cogeração. A eletricidade produzida compreende 16,23% da exergia disponível e o vapor produzido 11,07%.

### 5.2.4.3. Reaquecimento e três regeneradores

A Figura 5.25 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergéticos quando utilizado três regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do terceiro regenerador, menos quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergético fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 337,1 MW, 6,94% menos em comparação com o ciclo convencional.

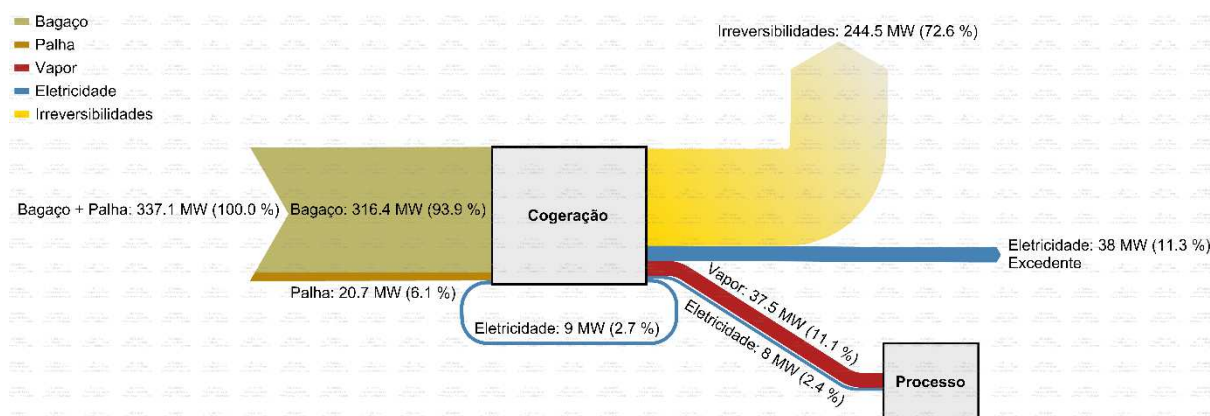


Figura 5.25 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento e três regeneradores

A Figura 5.26 permite também a visualização do aproveitamento exergético quando incorporado um sistema de reaquecimento e três regeneradores simultâneo no ciclo de cogeração.

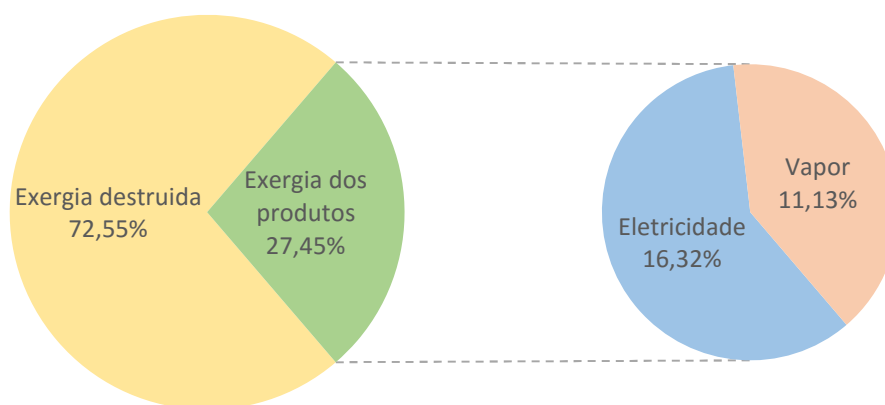


Figura 5.26 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e três regeneradores

Com a adição de três regeneradores, a exergia disponível aumento em 1,94 pontos percentuais com relação ao ciclo convencional. A eletricidade produzida representa 16,32% da exergia disponível enquanto que o vapor produzido representa 11,13% dessa exergia.

#### 5.2.4.4. Reaquecimento e quatro regeneradores

A Figura 5.27 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergeticos quando utilizado quatro regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do quarto regenerador, menos quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergetico fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 335,8 MW, 7,28% menos em comparação com o ciclo convencional.

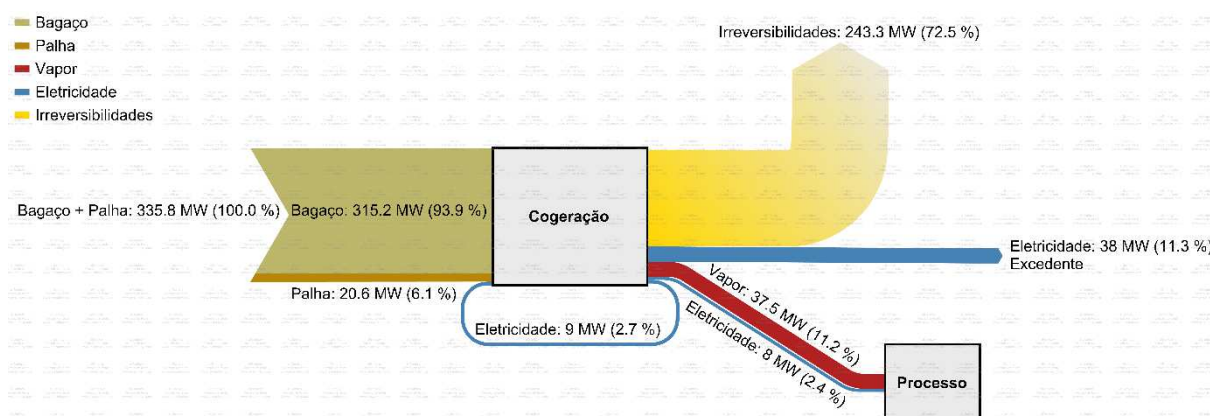


Figura 5.27 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento e quatro regeneradores

A Figura 5.28 permite também a visualização do aproveitamento exergetico quando incorporado um sistema de reaquecimento e quatro regeneradores simultâneo no ciclo de cogeração.

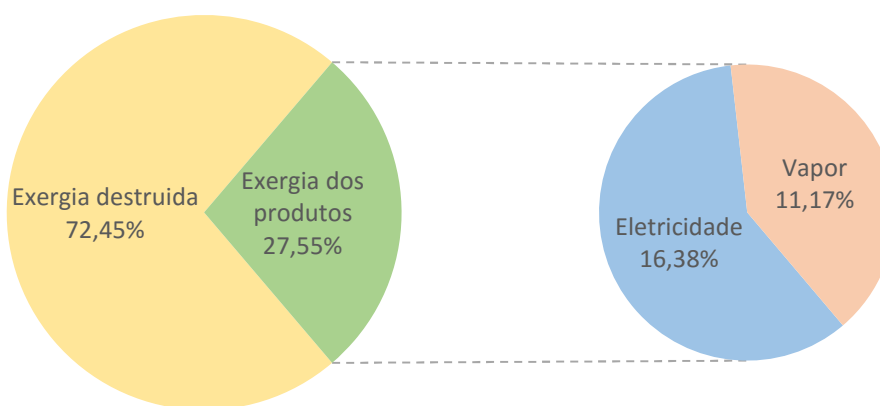


Figura 5.28 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e quatro regeneradores

Observa-se na Figura 5.28 que 72,45% da exergia é destruída devido às irreversibilidades do sistema de cogeração. A eletricidade produzida compreende 16,38% da exergia disponível. O vapor produzido compreende 11,17% da exergia disponível, aproveitada no processo de produção de açúcar e álcool.

#### 5.2.4.5. Reaquecimento e cinco regeneradores

A Figura 5.29 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergeticos quando utilizado cinco regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do quinto regenerador, menos quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergetico fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 335,1 MW, 7,46% menos em comparação com o ciclo convencional.

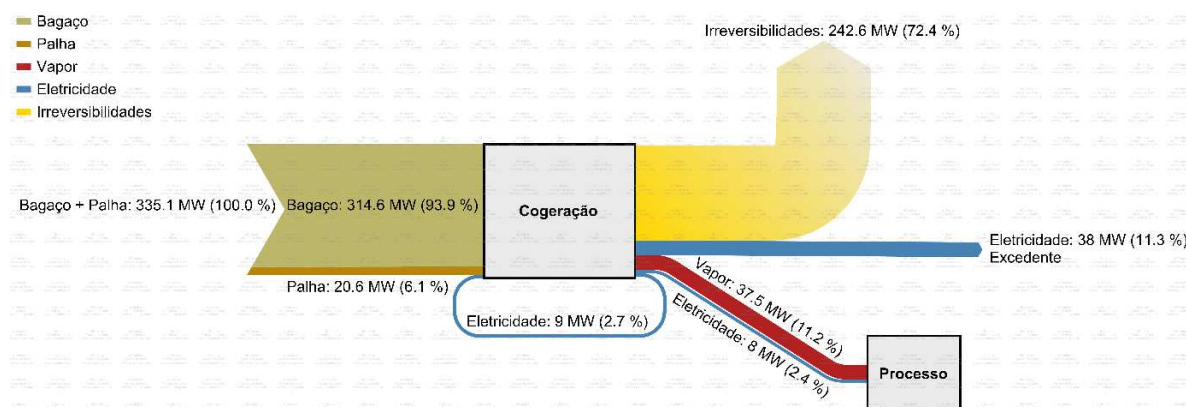


Figura 5.29 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento e cinco regeneradores

A Figura 5.30 permite também a visualização do aproveitamento exergetico quando incorporado um sistema de reaquecimento e cinco regeneradores simultâneo no ciclo de cogeração.

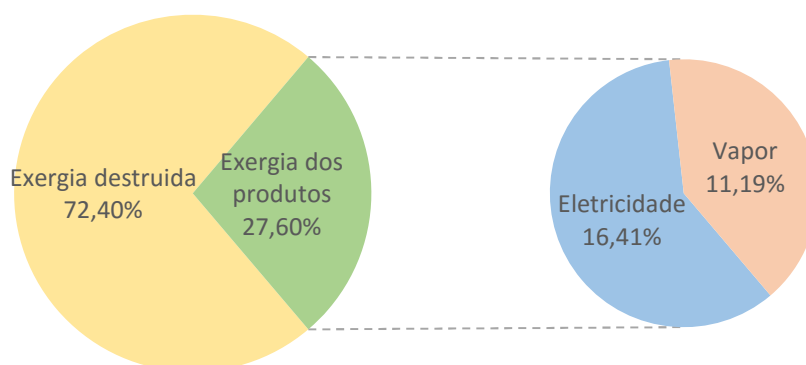


Figura 5.30 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e cinco regeneradores

Verifica-se na Figura 5.30 que, com a incorporação de cinco regeneradores no ciclo de cogeração, menos exergia é destruída no sistema, aumentando a exergia disponível em 2,06 pontos percentuais em relação ao ciclo convencional. A eletricidade produzida representa





caso base. Essa exergia disponível divide-se em 16,44% eletricidade, e a parcela restante 11,21% que corresponde à exergia do vapor, é aproveitada no processo de fabricação de açúcar e álcool.

#### 5.2.4.7. Reaquecimento e sete regeneradores

A Figura 5.33 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergéticos quando utilizado sete regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do sétimo regenerador, menos quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração. O valor do fluxo exergético fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 334,2 MW, 7,73% menos em comparação com o ciclo convencional.

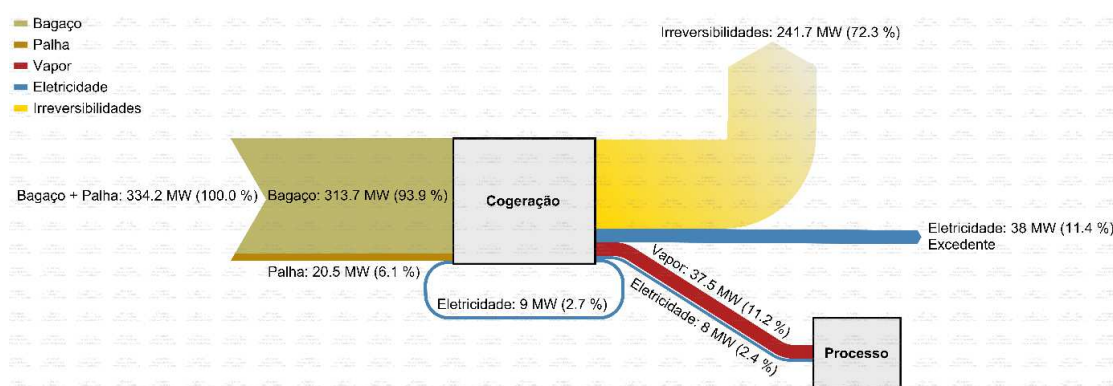


Figura 5.33 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento e sete regeneradores

A Figura 5.34 permite também a visualização do aproveitamento exergético quando incorporado um sistema de reaquecimento e sete regeneradores simultâneos no ciclo de cogeração.

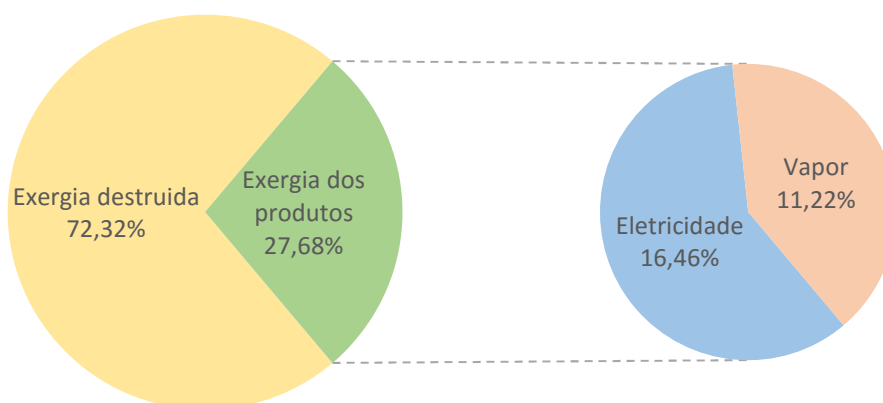


Figura 5.34 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e sete regeneradores



Na Figura 5.34 tem-se que 72,32% da exergia é destruída devido às irreversibilidades do sistema de cogeração. A eletricidade produzida compreende 16,46% da exergia disponível e o vapor produzido 11,22%.

#### 5.2.4.8. Reaquecimento e oito regeneradores

A Figura 5.35 apresenta o diagrama de Grassmann mostrando os fluxos exergéticos quando utilizado oito regeneradores no ciclo de cogeração. Com a incorporação do oitavo regenerador, quantidade de biomassa é consumida no sistema de cogeração é ainda menor. O valor do fluxo exergético fornecido pelo bagaço junto com a palha como combustível suplementar é de 334,1 MW, isso é 7,83% menos em comparação com o ciclo convencional.

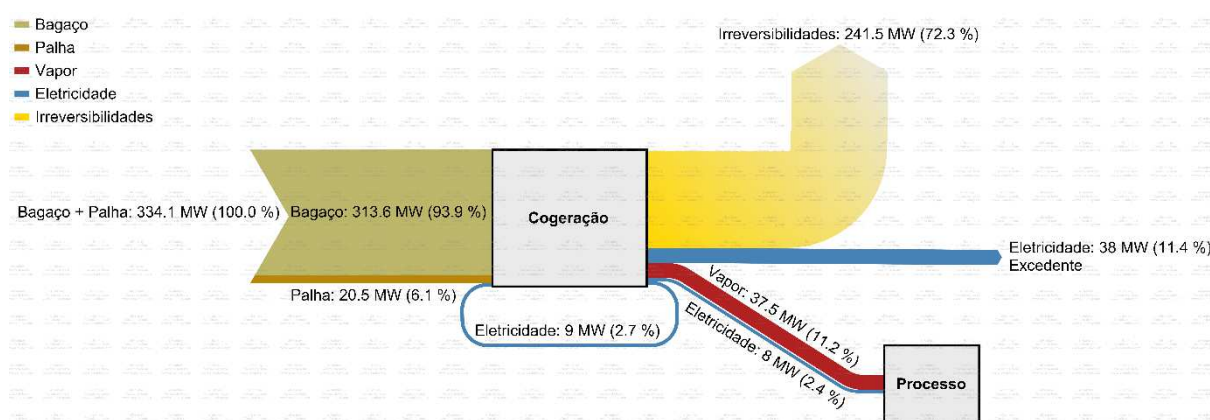


Figura 5.35 – Diagrama de Grassmann para o ciclo com reaquecimento e oito regeneradores

A Figura 5.36 permite também a visualização do aproveitamento exergético quando incorporado um sistema de reaquecimento e oito regeneradores simultâneo no ciclo de cogeração.

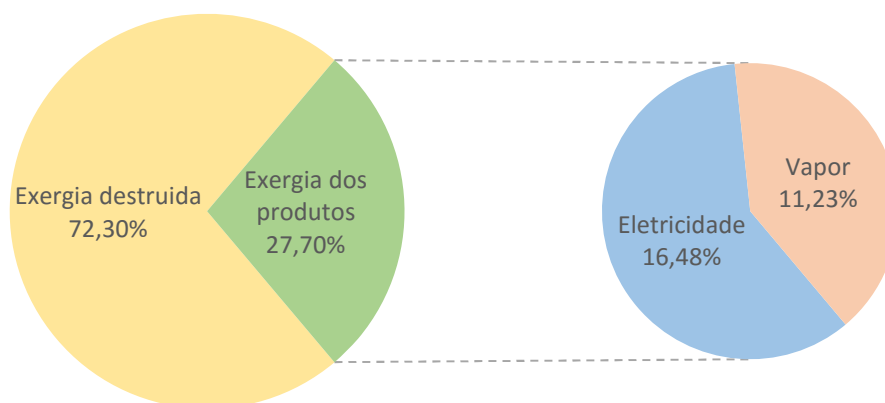


Figura 5.36 – Distribuição da exergia para o ciclo com reaquecimento e oito regeneradores

Finalmente com a adição de oito regeneradores, a exergia disponível aumento em 2,16 pontos percentuais com relação ao ciclo convencional, atingindo com esta configuração o máximo ganho de exergia disponível. A eletricidade produzida representa 16,48% da exergia disponível enquanto que o vapor produzido representa 11,23% dessa exergia.

A Tabela 5.1 resume a exergia destruída em cada equipamento para todos os cenários avaliados (considerando como volume de controle o sistema de cogeração). A Figura 5.37 permite apreciar esta mesma comparação entre os melhores casos de cada cenário avaliado (oito regeneradores no cenário regenerativo (C2) e uma etapa de reaquecimento com oito regeneradores no Cenário com reaquecimento e regeneração simultânea (C3).

Para melhor entendimento da Figura 5.37, os equipamentos listados desde o condensador (C) até a torre de resfriamento (P) tiveram suas exibições ampliadas. Pode-se apreciar a exergia destruída na caldeira em comparação aos outros equipamentos do ciclo de cogeração, e sua diminuição conforme são implementadas as melhoras em cada cenário (C1, C2 e C3). Observa-se um aumento da exergia destruída no dessuperaquecedor no cenário com reaquecimento (C1), devido à necessidade de atemperar o vapor reaquecido que é extraído para processo.

Pode-se observar, como esperado, que a maior destruição de exergia acontece na caldeira em comparação aos outros equipamentos do ciclo de cogeração. Isso devido as irreversibilidades associadas à elevada diferença de temperatura entre os gases no forno e o vapor produzido; e ao próprio processo de combustão e as perdas que acontecem com os gases de escape (~9,4%), combustível não queimado (~2%), combustão química incompleta (~1%), radiação e convecção (~0,46%), cinzas e extração de vapor do domo para remoção de impurezas (~0,5%) (SOSA-ARNAO *et al.*, 2006).

Tabela 5.1 – Exergia destruída em cada equipamento em kW

|                    |   | Convencional | Reaquec. | Regenerativo (C2) |        |        |        |        |        |        |        | Com reaquecimento e regeneração (C3) |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|---|--------------|----------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Equipamento        |   | (C0)         | (C1)     | 1                 | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 1                                    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
| Caldeira           | A | 254785       | 247706   | 237774            | 233989 | 232068 | 230888 | 230174 | 229598 | 229226 | 228884 | 234060                               | 231053 | 229512 | 228432 | 227930 | 227440 | 227235 | 227112 |
| Turbina            | B | 11954        | 10422    | 10567             | 10601  | 10596  | 10579  | 10584  | 10572  | 10577  | 10568  | 10043                                | 10218  | 10306  | 10303  | 10363  | 10365  | 10405  | 10427  |
| Condensador        | C | 985          | 379      | 514               | 392    | 325    | 282    | 256    | 235    | 221    | 208    | 140                                  | 67     | 50     | 16     | 18     | 4      | 8      | 9      |
| Bombas             | D | 294          | 259      | 310               | 323    | 330    | 334    | 337    | 340    | 341    | 343    | 289                                  | 302    | 311    | 315    | 320    | 322    | 325    | 328    |
| Desaerador         | E | 840          | 731      | 731               | 694    | 674    | 662    | 654    | 648    | 643    | 640    | 657                                  | 631    | 620    | 609    | 606    | 601    | 600    | 600    |
| Regenerador 1      | F |              |          | 2128              | 1046   | 631    | 428    | 318    | 246    | 193    | 159    | 2195                                 | 1077   | 644    | 436    | 322    | 249    | 195    | 160    |
| Regenerador 2      | G |              |          |                   | 1169   | 708    | 484    | 351    | 272    | 225    | 187    | 0                                    | 1268   | 755    | 514    | 368    | 284    | 234    | 194    |
| Regenerador 3      | H |              |          |                   |        | 796    | 526    | 387    | 297    | 237    | 196    | 0                                    | 0      | 875    | 575    | 418    | 319    | 253    | 207    |
| Regenerador 4      | I |              |          |                   |        |        | 606    | 425    | 319    | 255    | 209    | 0                                    | 0      | 0      | 677    | 469    | 350    | 277    | 225    |
| Regenerador 5      | J |              |          |                   |        |        |        | 492    | 360    | 278    | 230    | 0                                    | 0      | 0      | 0      | 549    | 401    | 306    | 251    |
| Regenerador 6      | K |              |          |                   |        |        |        |        | 413    | 312    | 241    | 0                                    | 0      | 0      | 0      | 0      | 464    | 348    | 267    |
| Regenerador 7      | L |              |          |                   |        |        |        |        |        | 359    | 277    | 0                                    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 402    | 309    |
| Regenerador 8      | M |              |          |                   |        |        |        |        |        |        | 318    | 0                                    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 355    |
| Dessuperaquecedor  | N | 370          | 3248     | 67                | 75     | 75     | 75     | 75     | 75     | 75     | 75     | 1891                                 | 1735   | 1454   | 1421   | 1261   | 1230   | 1139   | 1080   |
| Mix                | O | 51           | 20       | 28                | 22     | 18     | 16     | 14     | 13     | 13     | 12     | 8                                    | 4      | 3      | 1      | 1      | 0      | 0      | 1      |
| Torre Resfriamento | P | 384          | 146      | 199               | 151    | 126    | 109    | 99     | 91     | 85     | 80     | 54                                   | 26     | 19     | 6      | 7      | 2      | 3      | 4      |

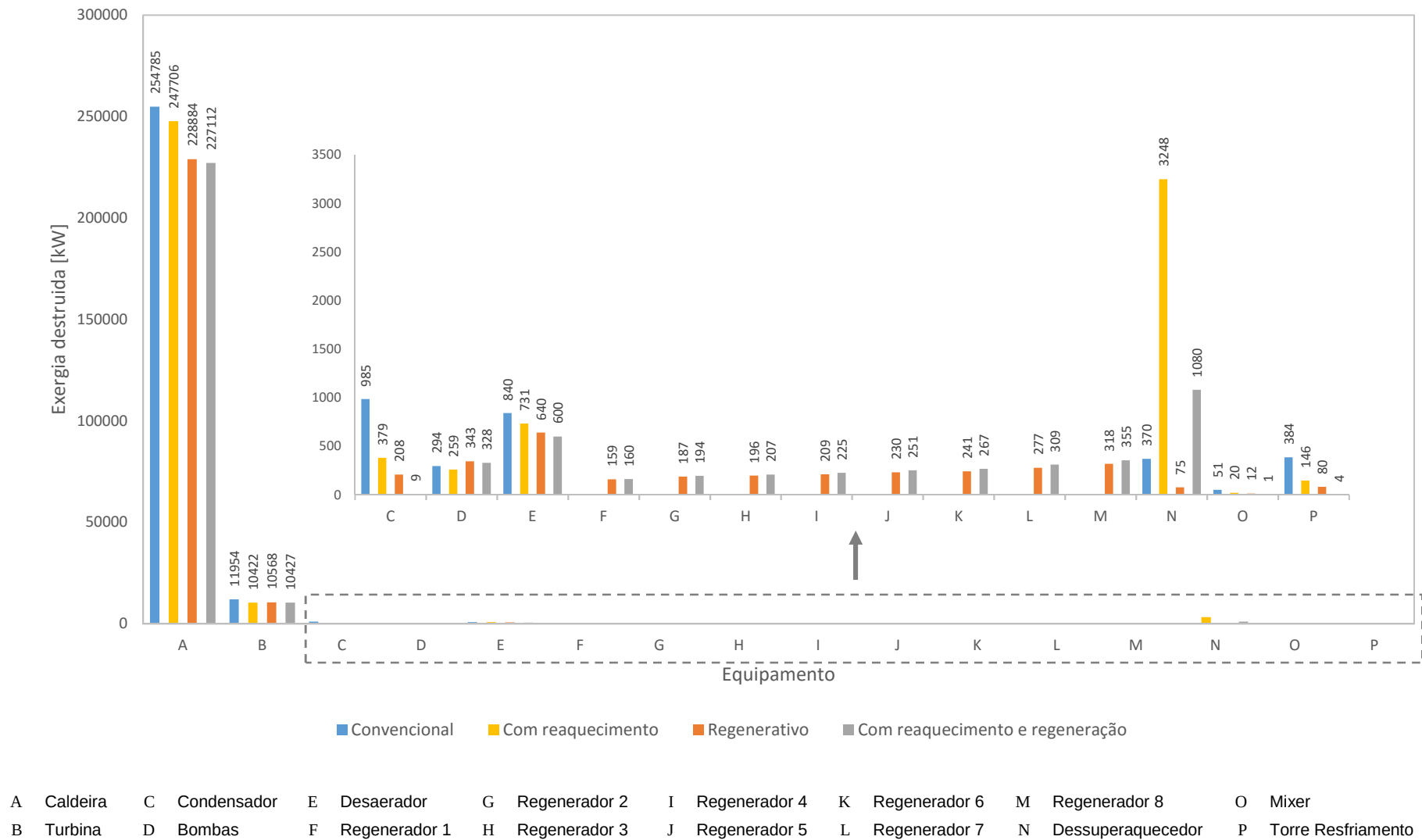


Figura 5.37 – Exergia destruída com oito regeneradores para cada equipamento

### 5.3. Eficiência exergética da Caldeira

Associado ao uso da análise de exergia, é utilizado o conceito de eficiência determinada a partir do ponto de vista da segunda lei da termodinâmica  $\eta_{exe}$ . A eficiência exergética na caldeira,  $\eta_{exe_c}$ , é definida como a razão entre a variação da taxa de exergia da água que flui através da caldeira,  $(\dot{m}_e e_{fe} - \dot{m}_s e_{fs})$ , e a taxa de exergia do combustível que alimenta a caldeira,  $(\dot{m}_{comb} e_{f_{comb}})$ . Sendo assim:

$$\eta_{exe_c} = \frac{\dot{m}_e e_{fe} - \dot{m}_s e_{fs}}{\dot{m}_{comb} e_{f_{comb}}}$$

A tabela 5.2 e a Figura 5.38 apresentam os resultados da eficiência exergética da Caldeira para cada alternativa considerada.

Tabela 5.2 – Eficiência exergética da Caldeira

| Cenário               | Exergia dos Produtos (kW) | Exergia dos Recursos Combustível (kW) | $\eta_{exe}$ |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------|
| Convencional          | 107.382                   | 362.167                               | 29,65%       |
| Reaquecimento         | 107.710                   | 355.415                               | 30,31%       |
| Regeneração 1         | 107.052                   | 344.826                               | 31,05%       |
| Regeneração 2         | 106.977                   | 340.966                               | 31,37%       |
| Regeneração 3         | 106.780                   | 338.849                               | 31,51%       |
| Regeneração 4         | 106.604                   | 337.492                               | 31,59%       |
| Regeneração 5         | 106.502                   | 336.676                               | 31,63%       |
| Regeneração 6         | 106.385                   | 335.983                               | 31,66%       |
| Regeneração 7         | 106.324                   | 335.549                               | 31,69%       |
| Regeneração 8         | 106.248                   | 335.132                               | 31,70%       |
| Reaq. e Regeneração 1 | 107.738                   | 341.798                               | 31,52%       |
| Reaq. e Regeneração 2 | 107.833                   | 338.886                               | 31,82%       |
| Reaq. e Regeneração 3 | 107.543                   | 337.055                               | 31,91%       |
| Reaq. e Regeneração 4 | 107.382                   | 335.813                               | 31,98%       |
| Reaq. e Regeneração 5 | 107.208                   | 335.138                               | 31,99%       |
| Reaq. e Regeneração 6 | 107.098                   | 334.539                               | 32,01%       |
| Reaq. e Regeneração 7 | 107.010                   | 334.246                               | 32,02%       |
| Reaq. e Regeneração 8 | 106.966                   | 334.079                               | 32,02%       |

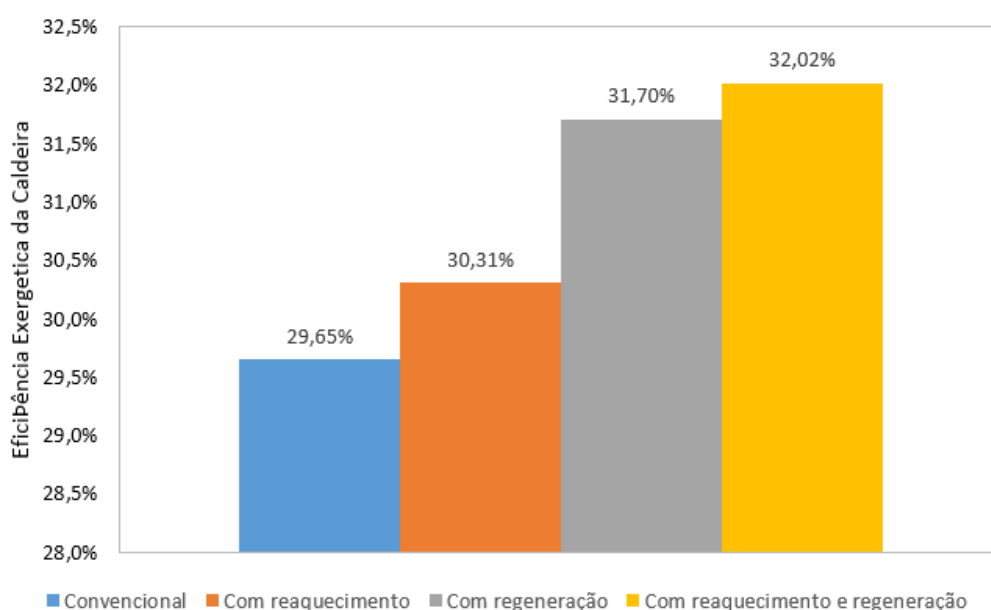


Figura 5.38 – Eficiência Exergética da Caldeira

Pode-se apreciar como o aumento da eficiência da Caldeira diminui a exergia destruída, quando são aplicadas as diferentes alternativas de melhoras consideradas neste trabalho. Com a incorporação do Reaquecimento (C1), a destruição de exergia na Caldeira representa 69,69% e a eficiência exergética aumenta a 30,31%, isso devido a que no cenário com reaquecimento a exergia dos produtos aumenta com a parcela de vapor reaquecido  $(\dot{m}_{02}e_{f02} - \dot{m}_{01}e_{f01}) + \underbrace{(\dot{m}_{04}e_{f04} - \dot{m}_{03}e_{f03})}_{\text{aumenta com reaquecimento}}$  e o fluxo mássico de combustível diminui  $\left(\underbrace{\dot{m}_{comb}}_{\text{decrece}} e_{fcomb}\right)$ .

Com a adição de Regeneradores ao ciclo de cogeração a exergia destruída na Caldeira diminui ainda mais. Com oito regeneradores se consegue 68,30% e a eficiência exergética aumenta a 31,70%. Mesmo com a leve diminuição da exergia dos produtos  $\left(\dot{m}_{02}e_{f02} - \underbrace{\dot{m}_{01}e_{f01}}_{\text{aumenta com reaquecimento}}\right)$ , a eficiência aumenta graças à diminuição significativa do fluxo mássico de combustível.

Com a incorporação de reaquecimento e regeneração ao sistema de cogeração a exergia destruída na Caldeira represent 67,98% dos recursos de entrada e a eficiência exergética aumenta a 32,02%, devido basicamente ao aumento da exergia dos produtos pelo

reaquecimento  $(\dot{m}_{02}e_{f02} - \dot{m}_{01}e_{f01}) + \underbrace{(\dot{m}_{04}e_{f04} - \dot{m}_{03}e_{f03})}_{\text{aumenta com reaquecimento}}$ , junto ao menor consumo de combustível,  $\dot{m}_{comb}$ .

É evidente como combinação de reaquecimento e regeneração contribuem no aumento da eficiência exergética e diminuição da exergia destruída na Caldeira, um dos componentes críticos do sistema de cogeração.

## 6. CONCLUSÕES

Evidenciou-se as vantagens de incorporar sistemas de reaquecimento, regeneração e reaquecimento e regeneração simultâneo, nos sistemas de cogeração de usinas sucroalcooleiras brasileiras, visando um incremento na eficiência global da planta.

Da análise abrangente realizada é possível concluir que o Cenário que permite atingir a maior quantidade de bagaço excedente e o melhor aproveitamento exergético global de uma usina sucroalcooleira com relação ao Cenário Base (C0), é aquela que considera a incorporação de reaquecimento e regeneração no ciclo de cogeração (C3). Nesta ordem de ideias segue a Regeneração (C2) como opção atrativa e o Reaquecimento (C1) com desempenho menor.

Verificou-se a dependência da implementação do Reaquecimento e a Regeneração em relação à capacidade de geração de vapor. A quantidade total de vapor produzida no ciclo determinou tanto os níveis de pressão para extração para Reaquecimento (C1), quanto a quantidade máxima de regeneradores que podem ser instalados nos cenários Regenerativo (C2) e com Reaquecimento e Regeneração (C3).

A avaliação indicou que para uma capacidade de geração de vapor na ordem de 265 t/h (Grupo I) tem-se restrições na pressão de reaquecimento na faixa de 3 a 39 bar, e restrições na quantidade de regeneradores a serem instalados, limitando esse valor a máximo 2 (dois). Para uma capacidade de geração de vapor na ordem de 281,5 t/h (Grupo II) não existem restrições nos níveis de pressão para reaquecimento sendo que a quantidade de regeneradores, a serem instalados, aumentou a no máximo 8 (oito), sem afetar a demanda de vapor para processo.

A comparação indicou o máximo rendimento do ciclo quando implementado o Reaquecimento e Regeneração (C3), com incrementos percentuais no bagaço excedente com relação ao Cenário Base (C0), de 5,07% para o Grupo I e incrementos na faixa de 5,62 a 7,76% para o Grupo II. Quando implementada a Regeneração (C2), os incrementos percentuais no bagaço excedente atingiram a faixa de 4,79 a 5,86% para o Grupo I e 4,79 a 7,46% para o Grupo II. Finalmente quando implementado o Reaquecimento (C1), obtém-se incrementos percentuais no bagaço excedente de 1,72% e 1,86% para os Grupo I e II, respectivamente.

As comparações indicaram que o máximo rendimento é conseguido quando é implementada a Regeneração (C2) com incrementos percentuais no bagaço excedente com relação ao bagaço disponível, na faixa de 14,42 a 15,39% para o Grupo I e 9,03 a 11,59% para o Grupo II. Quando implementado o Reaquecimento e Regeneração (C3), os incrementos



percentuais no bagaço excedente atingiram 14,68% para o Grupo I e incrementos na faixa de 9,83 a 11,87% para o Grupo II. Finalmente quando implementado o Reaquecimento (C1), obtém-se incrementos percentuais no bagaço excedente de 11,66% e 6,24% para os Grupo I e II, respectivamente.

Na análise exergética realizada, pode-se comprovar o impacto que tem cada um dos sistemas incorporados na redução da exergia total destruída. A aplicação de reaquecimento (C1) consegue diminuir a exergia destruída em 2,5%, em tanto que o regenerativo (C2) e o reaquecido com regeneração (C3) conseguem reduções significativamente maiores nas faixas de 6,4 a 10,0 % e 7,5 a 10,4%, respectivamente.

A Caldeira é o equipamento que maior destruição de exergia produz. Neste equipamento, consegue-se diminuir em 2,8% com uso de reaquecimento (C1) e reduções na faixa de 6,7 a 10,2% e 8,1 a 10,9% quando incorporado regeneração (C2) e reaquecimento e regeneração (C3), respectivamente.

## **6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A fim de complementar-se o presente trabalho, sugere-se:

- Avaliação econômica das diferentes configurações consideradas neste trabalho.
- Avaliação do aumento do vácuo no condensador em adição às configurações propostas neste estudo.
- Análise exergética da caldeira considerando detalhadamente o processo de combustão e perdas exergéticas nos gases de escape.
- Estudo da utilização do bagaço excedente obtido nas diferentes configurações analisadas na produção de álcool celulósico (segunda geração), fabricação de papel, matéria-prima para a fabricação de painéis aglomerados, alimentação animal (ração), ou na produção de ainda mais energia elétrica.

## 7. REFERÊNCIAS

ALEXE, F.; CENUȘĂ, V.; OPRİȘ, I. Simultaneous Thermodynamic Optimization for CHPP with Steam Turbines. p. 119–123, 2014.

ALVES, M. Estudo De Sistemas De Cogeração Em Usinas De Açúcar E Álcool , Com Utilização Do Bagaço E Palha Da Cana. 2011.

ANEEL. *Matriz de Energia Elétrica*. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

BADR, O.; PROBERT, S. D.; O'CALLAGHAN, P. Rankine cycles for steam power-plants. *Applied Energy*, v. 36, p. 191–231, 1990.

BARREDA DEL CAMPO, E. R. *Estudo de possibilidades de incremento da cogeração em usinas açucareiras cubanas*. 1995. 229 f. Dissertação (Mestrado) - UNICAMP, Campinas - SP, 1995.

BEJAN, A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. 3rd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2006.

BELL, I. H. *et al*. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 53, n. 6, p. 2498–2508, 2014.

BHATT, M. S.; RAJKUMAR, N. Mapping of combined heat and power systems in cane sugar industry. *Applied Thermal Engineering*, v. 21, p. 1707–1719, 2001.

BNDES; CGEE. *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. 1ª. ed. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

BOCCI, E.; DI CARLO, A.; MARCELO, D. Power plant perspectives for sugarcane mills. *Energy*, v. 34, p. 689–698, 2009.

BRASCHER, P. *Simulação numérica de centrais termelétricas*. 1991. 231 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1991.

BRASIL. *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: Cana-de-açúcar*. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>.

CAMARGO, C. A. *et al*. *Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool*:

*manual de recomendações*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.

CARPIO, R. C. *et al.* Critérios de avaliação termodinâmica para sistemas de cogeração em usinas de açúcar. *COBEM*, 1999. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobem/1999/pdf/aacbdd.pdf>>.

CARROCCI, L. R.; JAMES, E. H. Cogeneration at alcohol production plants in Brazil. *Energy*, v. 16, n. 8, p. 1147–1151, 1991.

CENGEL, Y.; BOLES, M. *Termodinamica*. Séptima ed ed. Mexico: [s.n.], 2011.

CERUTTI PANOSSO, G. *Métodos de simulação para ciclos de Rankine*. 2003. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2003.

CGEE. *Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil*. . Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. , 2009

COLETA, J. R.; MARTINS, L. *Proposição de ações de melhoria de desempenho técnico e ambiental em unidade de cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro*. 2012. Escola Politécnica Da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2012.

CORRÊA NETO, V. *Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-açúcar e Gás Natural*. 2001. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

CREMONEZ, L. *Avaliação termodinâmica, termoeconômica e econômica de uma usina sucroalcooleira para diferentes mix de produção*. 2013. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira - SP, 2013.

DANTAS FILHO, P. L. *Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo*. 2009. 2009.

DANTAS, G. A.; LEGEY, L. F. L.; MAZZONE, A. Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 21, p. 356–364, 2013.

DARROW, K. *et al.* Catalog of CHP Technologies - U. S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership. n. March, 2015.

DESHMUKH, R. *et al.* Thermal gasification or direct combustion? Comparison of advanced cogeneration systems in the sugarcane industry. *Biomass and Bioenergy*, v. 55, p. 163–174, 2013.

DIAS, M. *et al.* Improving bioethanol production from sugarcane: Evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. *Energy*, v. 36, n. 6, p. 3691–3703, 2010.

DINCER, I.; AL-MUSLIM, H. Thermodynamic analysis of reheat cycle steam power plants. *International Journal of Energy Research*, v. 25, n. 8, p. 727–739, 2001.

DOS SANTOS, R. D. D. *O uso da biomassa da cana-de-açúcar para cogeração e produção de energia elétrica: Análise termodinâmica, termoeconômica e econômica – Estudo de caso*. 2014. 142 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2014.

ENSINAS, A. V *et al.* Analysis of cogeneration systems in sugar cane factories - alternative of steam and combined cycle power plants. *Ecos 2006*, p. 1177–1184, 2006.

ENSINAS, A. V *et al.* Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy Conversion and Management*, v. 48, p. 2978–2987, 2007.

ENSINAS, A. V. *et al.* Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy*, v. 34, p. 680–688, 2008.

FIOMARI, M. C. *Análise Energética e Exergética de uma Usina Sucroalcooleira do Oeste Paulista com Sistema de Cogeração de Energia em Expansão*. 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2004.

GE. *GateCycle*. Disponível em: <<http://www.ge-mcs.com/pt/bently-nevada-software/320-performance/1831-siweb-pl655.html>>. Acesso em: 30 nov. 2015.

GRANBIO. *Quem Somos. A GranBio empresa brasileira de biotecnologia industrial*. Disponível em: <<http://www.granbio.com.br/conteudos/quem-somos/>>. Acesso em: 27 abr. 2015.

HABIB, M. A.; SAID, S. A. M.; AL-ZAHARNA, I. Optimization of reheat pressures in thermal power plants. *Energy*, v. 20, n. 6, p. 555–565, 1995.

HASSUANI, S.; REGIS, M.; CARVALHO, I. *Biomass power generation*. . Piracicaba: PNUD-CTC. , 2005

HIGA, M. *Cogeração e Integração Térmica em Usinas de Açúcar e Alcool*. 2003. 137 f. Tese (Doutorado), UNICAMP, Campinas, SP, 2003.

HUGOT, E. *Handbook of Cane Sugar Engineeirng*. 3th. ed. Amsterdam: Elsevier B.V., 1986.

IKAHEIMONEN, E. T. *et al.* Fluidized bed reheat processes for biomass power plant applications. *Energy -Tech & ASME*, p. 31, 2013.

KAMATE, S. C.; GANGAVATI, P. B. Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries. *Applied Thermal Engineering*, v. 29, n. 5-6, p. 1187–1194, 2008.

MACEDO, J. P. *et al.* Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 19, n. 4, p. 814–825, 28 jan. 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-014-0702-9>>. Acesso em: 15 dez. 2014.

MAPA. *Anuário Estatístico da Agroenergia 2014*. Brasília, DF: Secretaria de Produção e Agroenergia, 2015.

MORAN, M.; SHAPIRO, H. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 7th. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2011.

NAG, P. K. *Power Plant engineering*. 3th. ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.

NOVACANA. *Matérias-primas do etanol de 2ª geração*. Disponível em: <<https://www.novacana.com/etanol/materias-primas/>>.

OJEDA, K.; SÁNCHEZ, E.; KAFAROV, V. Sustainable ethanol production from lignocellulosic biomass – Application of exergy analysis. *Energy*, v. 36, n. 4, p. 2119–2128, abr. 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544210004536>>.

OKURE, M. A. E. *et al.* A Novel Combined Heat and Power (CHP) Cycle Based on Gasification of Bagasse. *Advances in Engineering and Technology: Proceedings of the First International Conference on Advances in Engineering and Technology*, p. 465–472, 2006.

PASSOLONGO, R. *Avaliação Termodinâmica, Termoeconômica e Econômica da Integração de Sistemas de Gaseificação da Biomassa em uma Usina Sucroalcooleira*. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira - SP, 2011.

PELLEGRINI, L. F.; DE OLIVEIRA JUNIOR, S. Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermoeconomic and environmental analysis and optimization. *Energy*, v. 36,

n. 6, p. 3704–3715, 2010.

PELLEGRINI, L. F.; DE OLIVEIRA JUNIOR, S.; BURBANO, J. C. Supercritical steam cycles and biomass integrated gasification combined cycles for sugarcane mills. *Energy*, v. 35, p. 1172–1180, 2009.

PELLEGRINI, L. F.; ZANETTI, A. A.; DE OLIVEIRA JUNIOR, S. Uso do gás natural na indústria sucroalcooleira : sistemas de co-firing. *Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT*, 2006.

PELLEGRINI, M.; SOARES RAMOS, D.; VIEIRA, S. A cogeração no setor sucroalcooleiro – usinas de médio porte. *Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT*, 2003.

PERLINGEIRO, C. A. *Biocombustíveis no Brasil: Fundamentos, Aplicações e Perspectivas*. 1. ed. ed. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2014.

RAGHU RAM, J.; BANERJEE, R. Energy and cogeneration targeting for a sugar factory. *Applied Thermal Engineering*, v. 23, p. 1567–1575, 2003.

RENÓ, M. *Avaliação do Balanço Energético e dos Impactos Ambientais do Processo de Produção de Metanol a partir do Bagaço de Cana-de- açúcar , utilizando a ACV*. 2011. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2011.

ROCHA, G. *Análise Termodinâmica, Termoeconômica e Econômica de uma Usina Sucroalcooleira com Processo de Extração por Difusão*. 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira - SP, 2010.

ROMÃO JÚNIOR, R. A. *Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira*. 2009. 164 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2009.

SÁNCHEZ PRIETO, M. G. *Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro- Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro- Alcooleira , Estudo de Caso .* 2003. 255 f. Tese (Doutorado) - UNICAMP, Campinas - SP, 2003.

SCHUCH PINTO, C. E. “*Estudo de viabilidade econômica da produção de energia elétrica a partir da utilização de resíduos da cana-de-açúcar no Brasil*”. 2003. 1-86 f. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2003.

SEABRA, J. *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da*

*biomassa de cana no Brasil*. 2008. Tese (Doutorado), UNICAMP, Campinas, SP, 2008.

SEABRA, J.; MACEDO, I. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy*, v. 39, n. 1, p. 421–428, 2010.

SOSA-ARNAO, J. H. *et al.* Two Proposals to determine the efficiency of bagasse boiler. *Proceedings of 6th International Congress on Distributed Generation and Energy in Rural Environments*, 2006.

SURESH, M. V. J. J.; REDDY, K. S.; KOLAR, A. K. 4-E (Energy, Exergy, Environment, and Economic) analysis of solar thermal aided coal-fired power plants. *Energy for Sustainable Development*, v. 14, n. 4, p. 267–279, 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0973082610000517>>.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*. New York: Hemisphere, 1988.

UCHÔA, T. B. *Análise da Viabilidade Técnica e Econômica da Utilização de Gás Natural como Combustível Complementar em Usinas Sucroalcooleiras*. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira - SP, 2005.

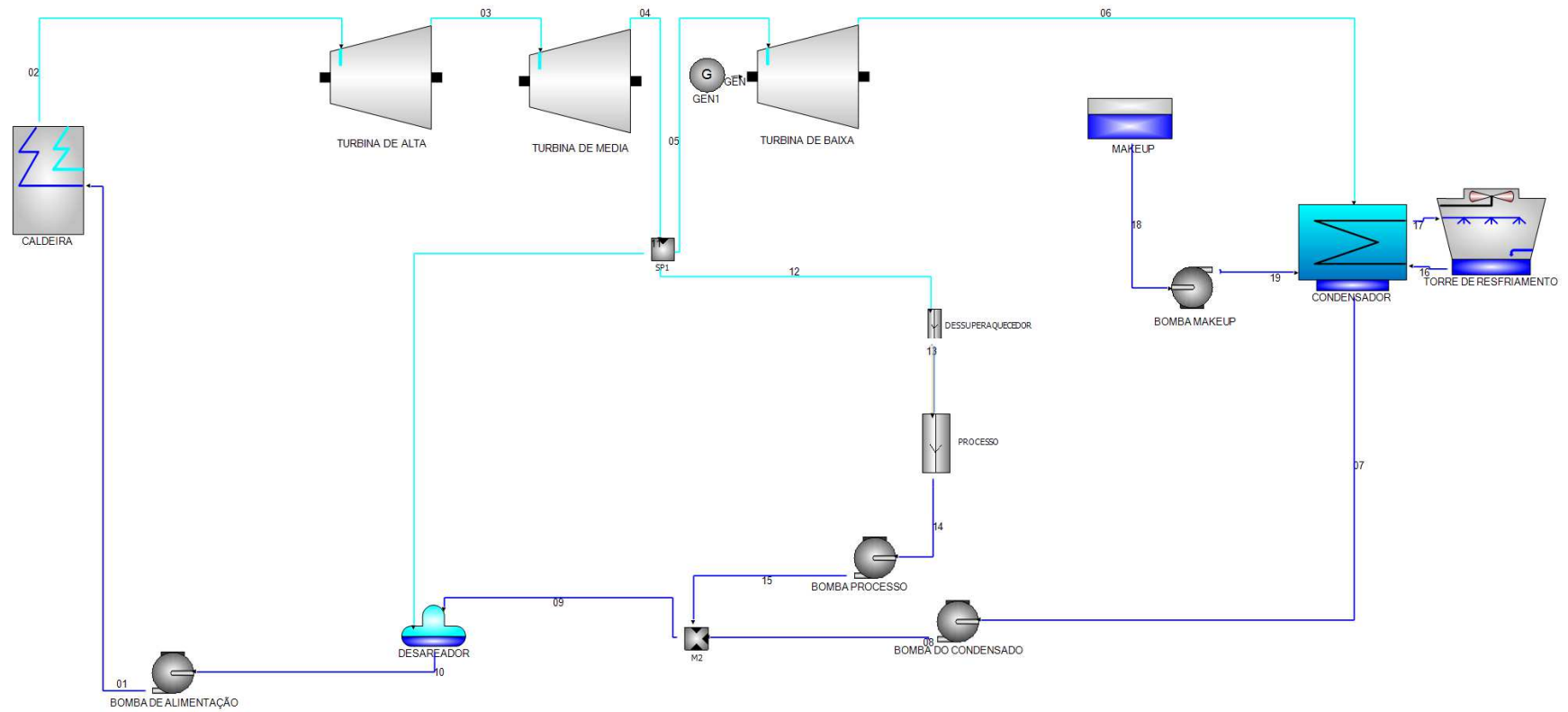
WALTER, A. C. DA S. *Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termelétrica junto ao setor sucroalcooleiro*. 1994. 263 f. Tese (Doutorado) - UNICAMP, Campinas - SP, 1994.

WALTER, A.; LLAGOSTERA, J. Feasibility analysis of co-fired combined-cycles using biomass-derived gas and natural gas. *Energy Conversion and Management*, v. 48, p. 2888–2896, 2007.

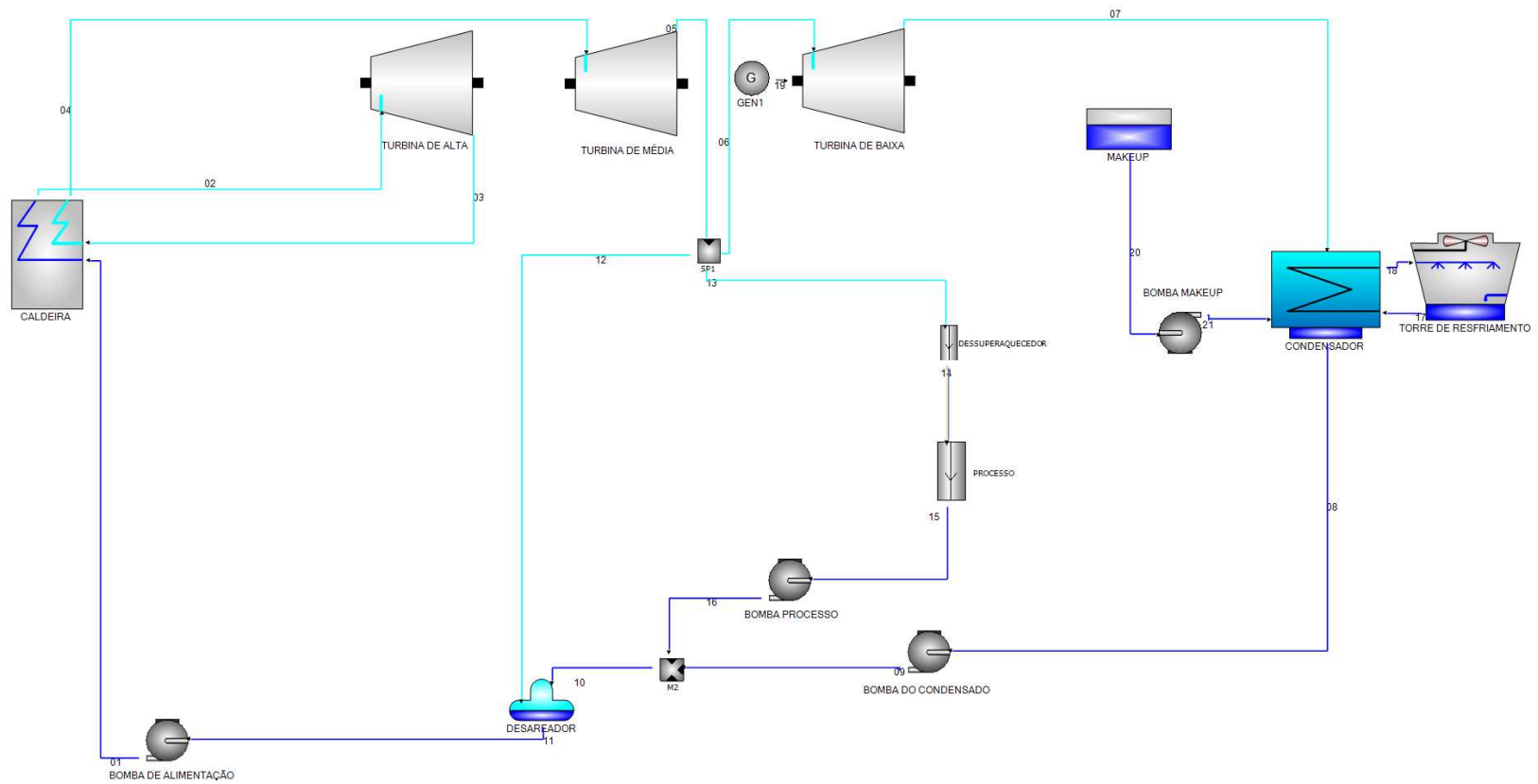
## **ANEXOS**



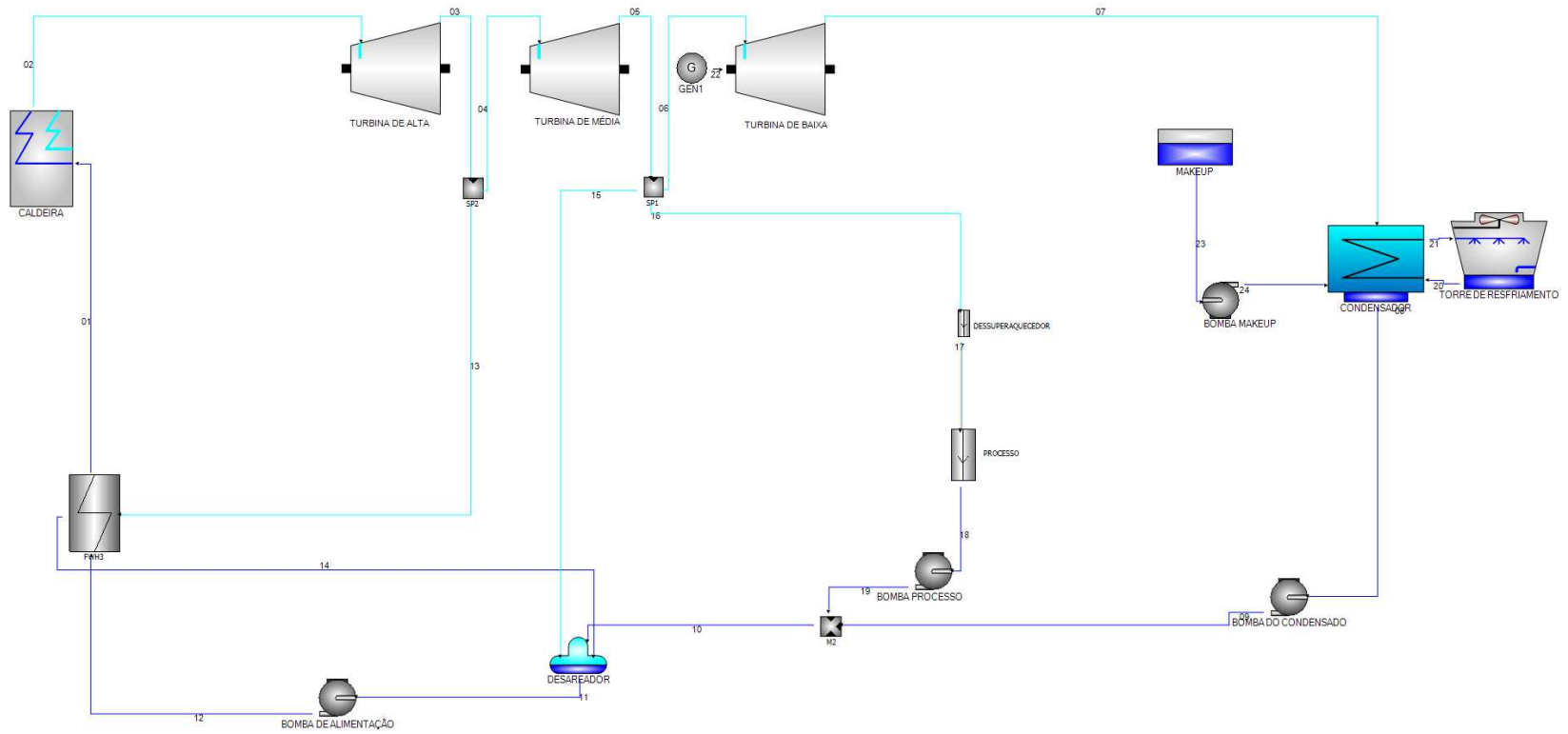
## Anexo AI – Esquemas dos cenários de cogeração



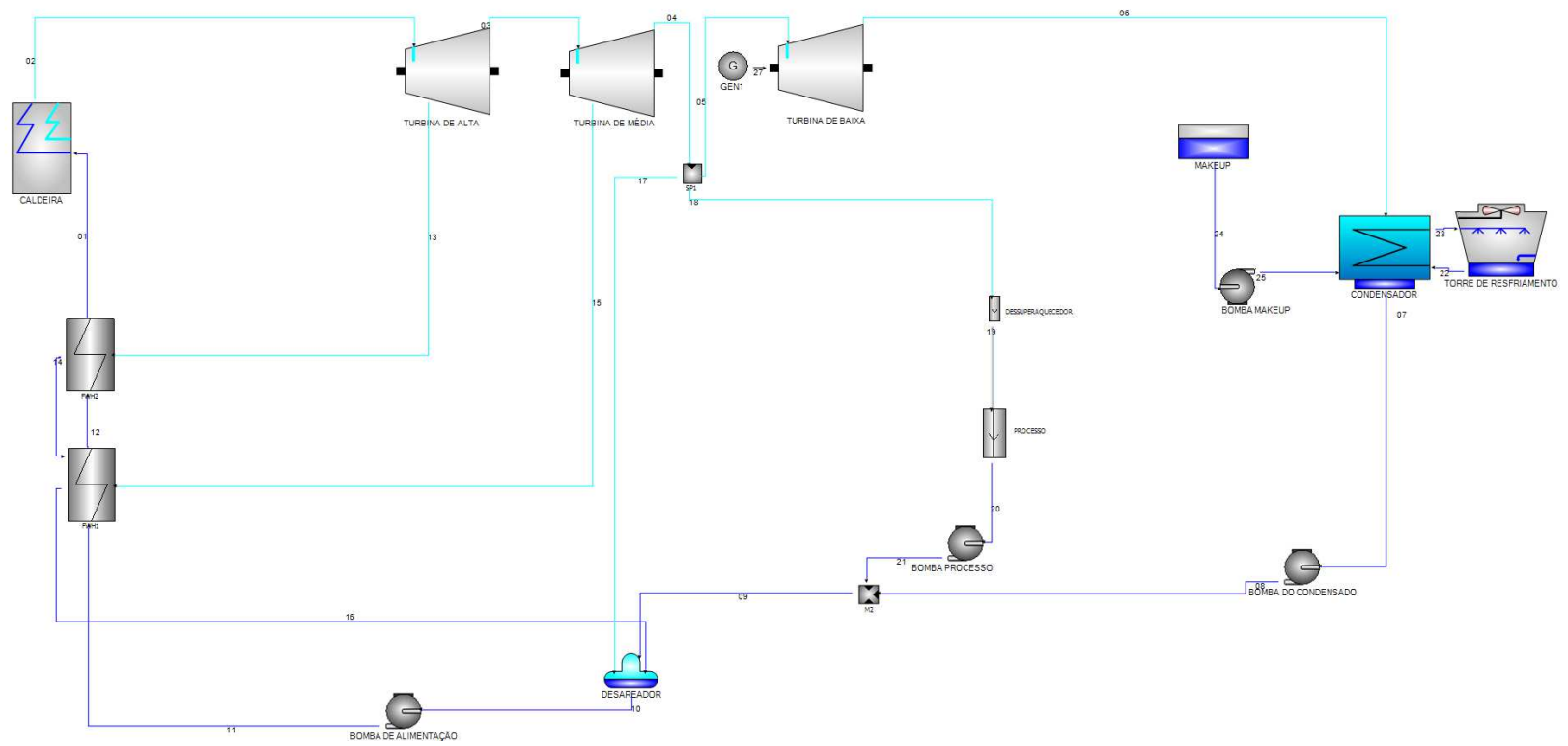
Anexo AI. 1 – Cenário Base (Convencional)



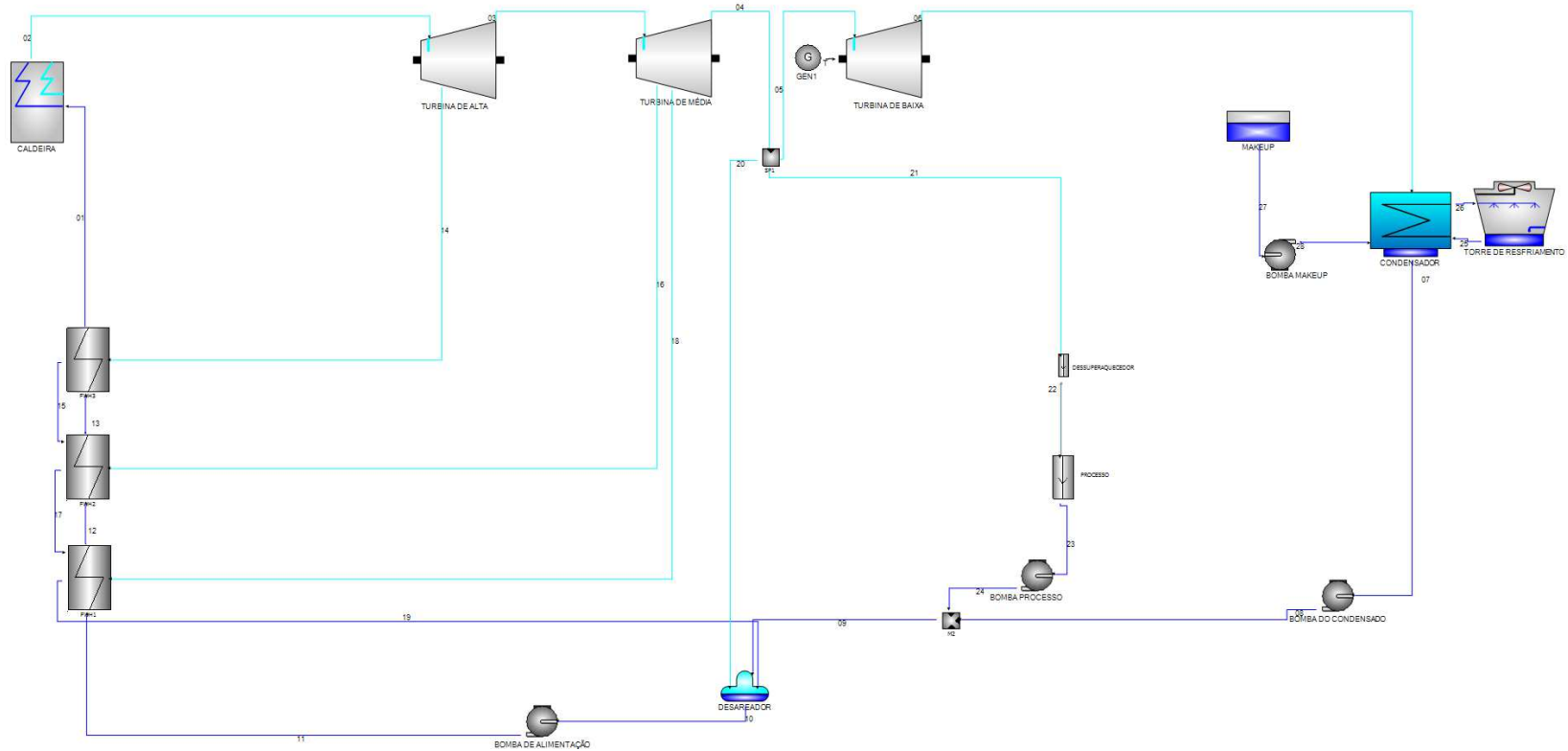
Anexo AI. 2 — Cenário com Reaquecimento



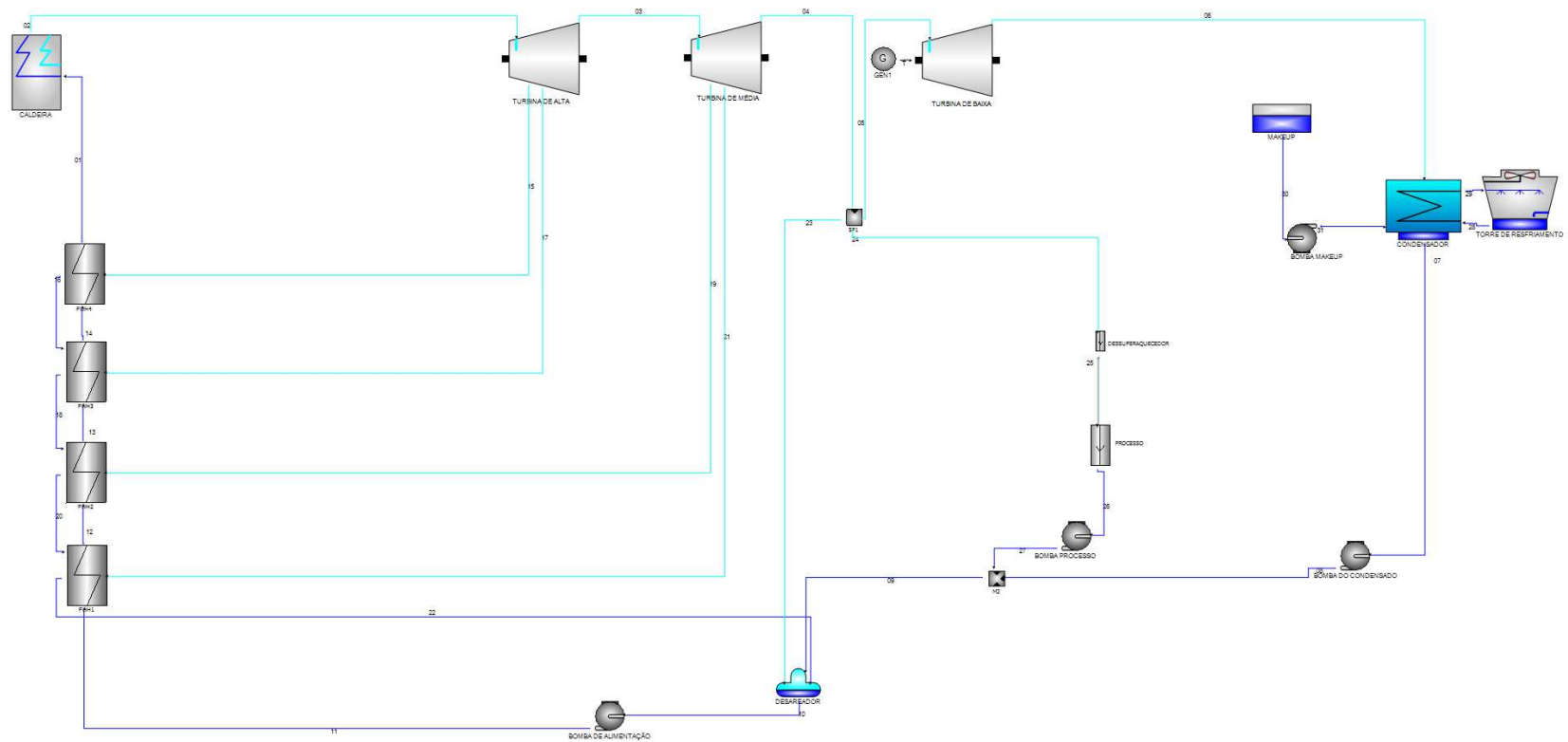
Anexo AI. 3 — Cenário com um (1) Regenerador



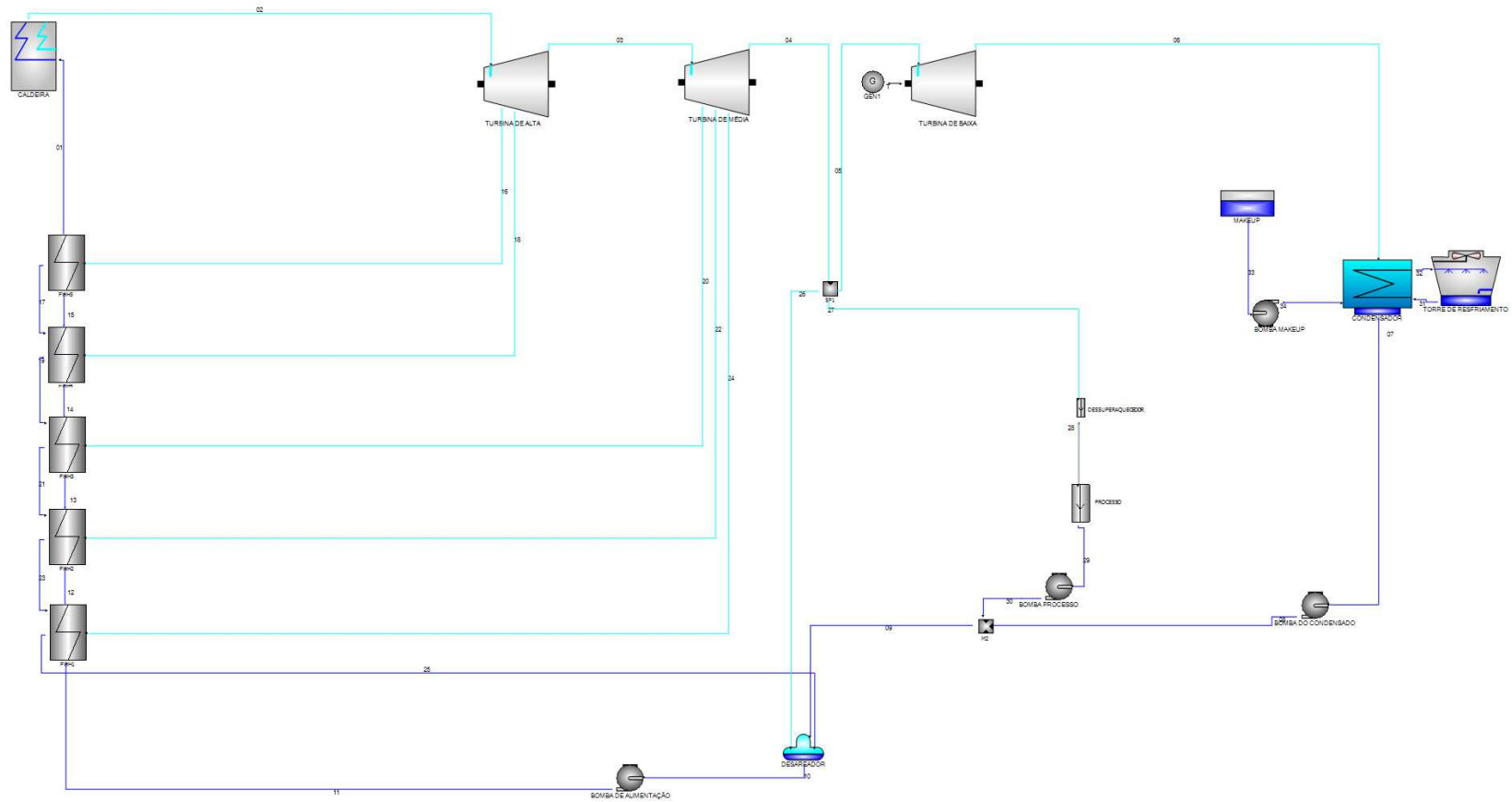
Anexo AI. 4 – Cenário com dois (2) Regeneradores



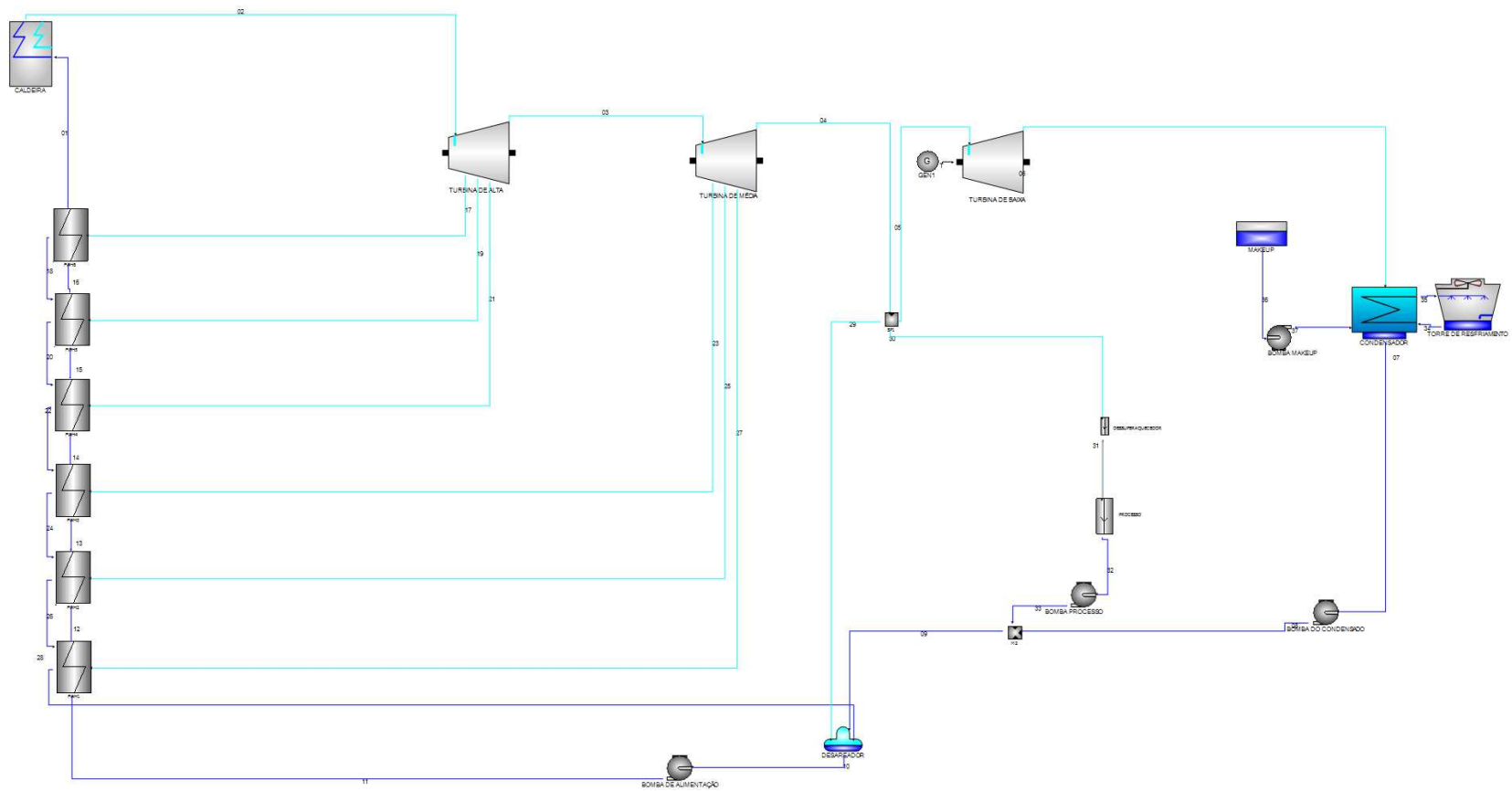
Anexo AI. 5 — Cenário com três (3) Regeneradores



Anexo AI. 6 — Cenário com quatro (4) Regeneradores

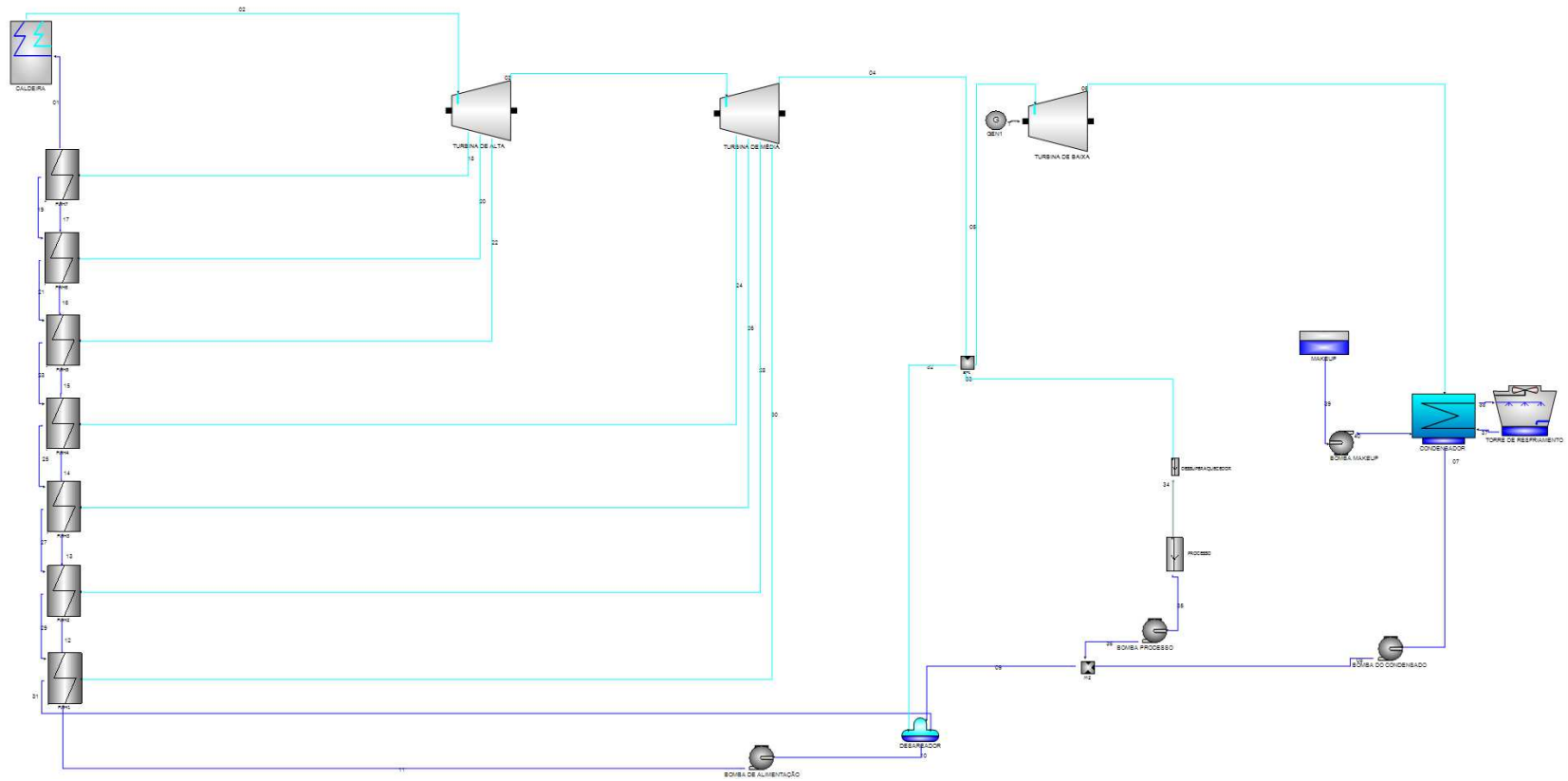


Anexo AI. 7 – Cenário com cinco (5) Regeneradores

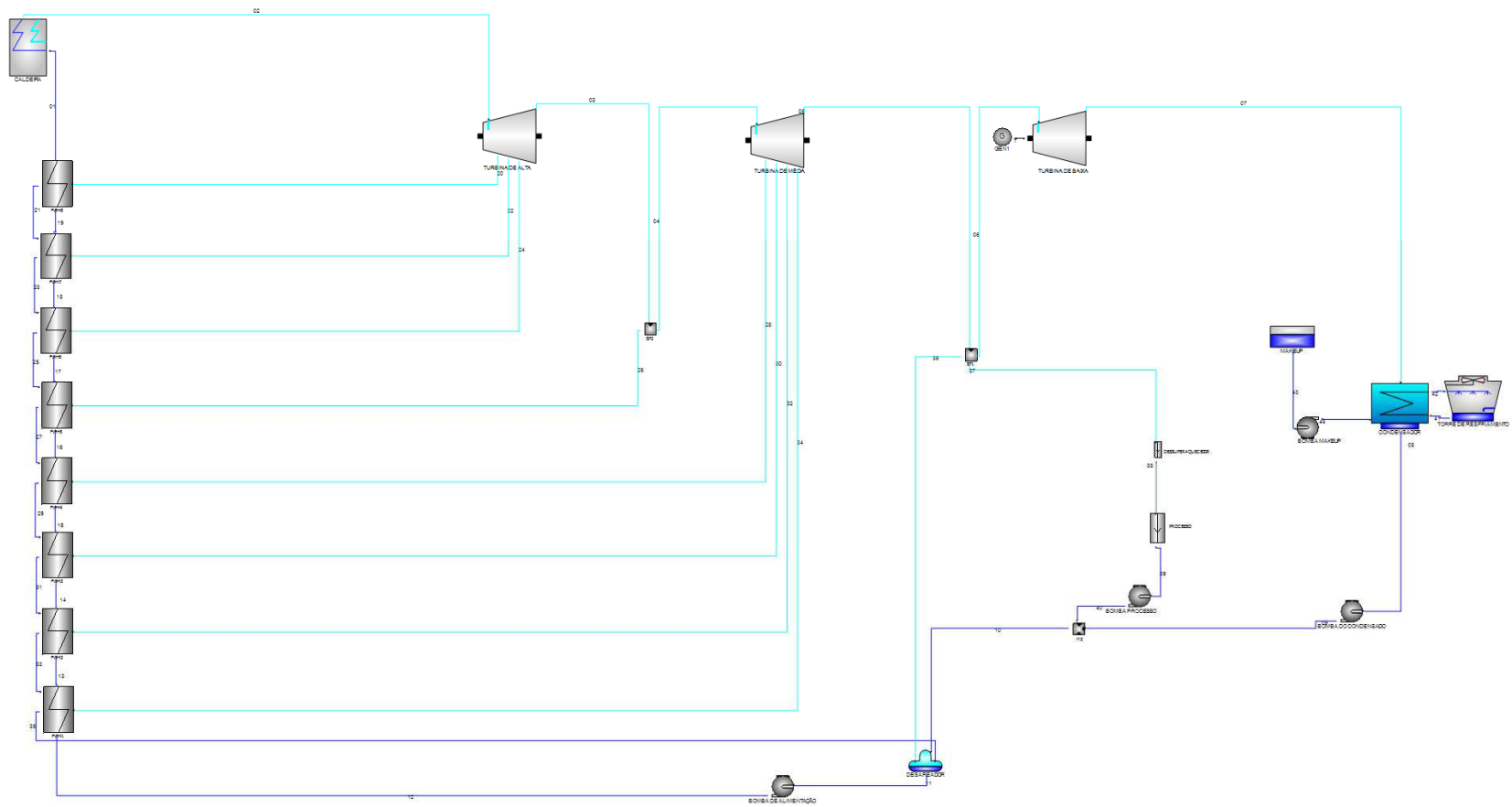


Anexo AI. 8 — Cenário com seis (6) Regeneradores

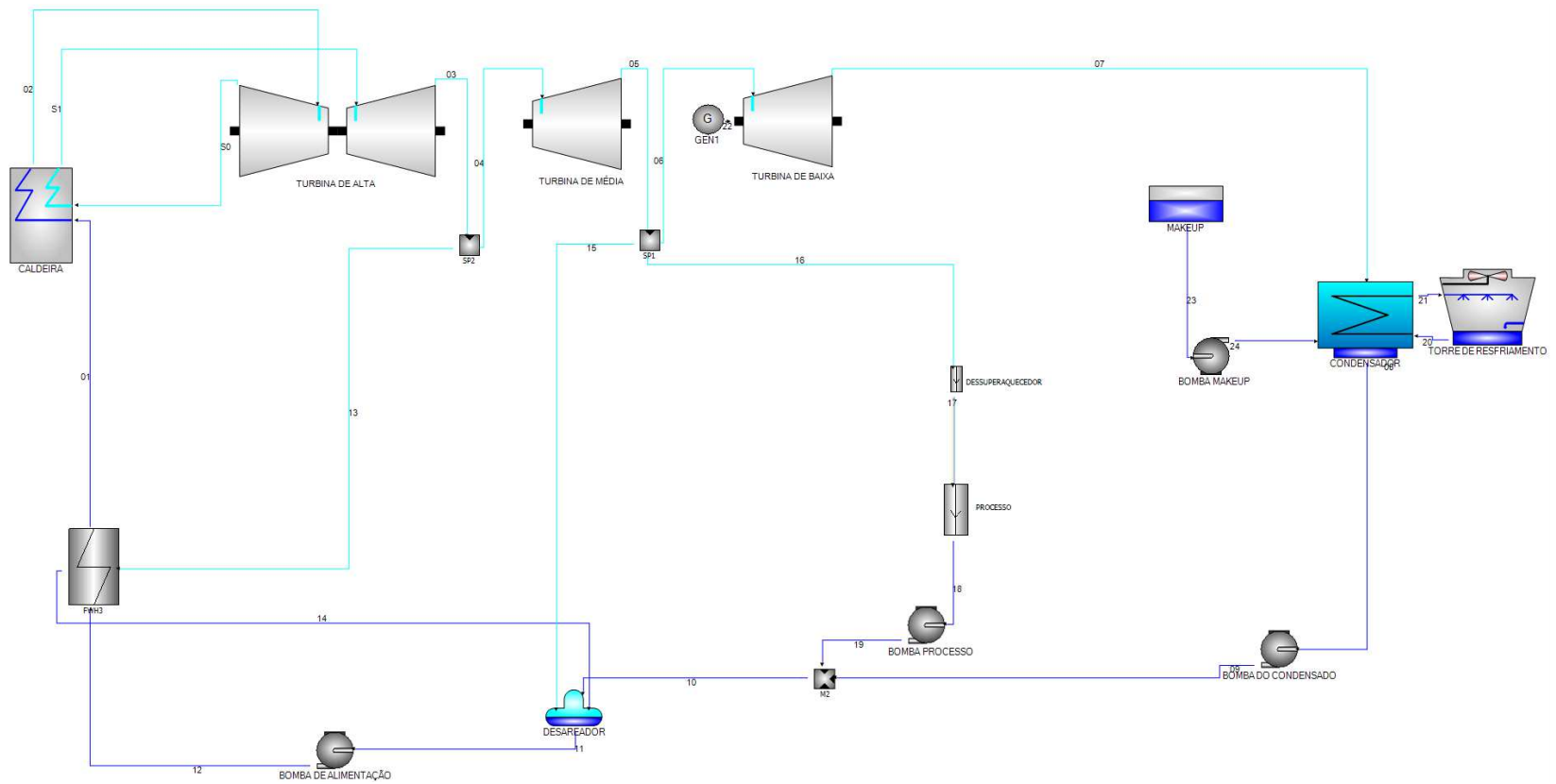




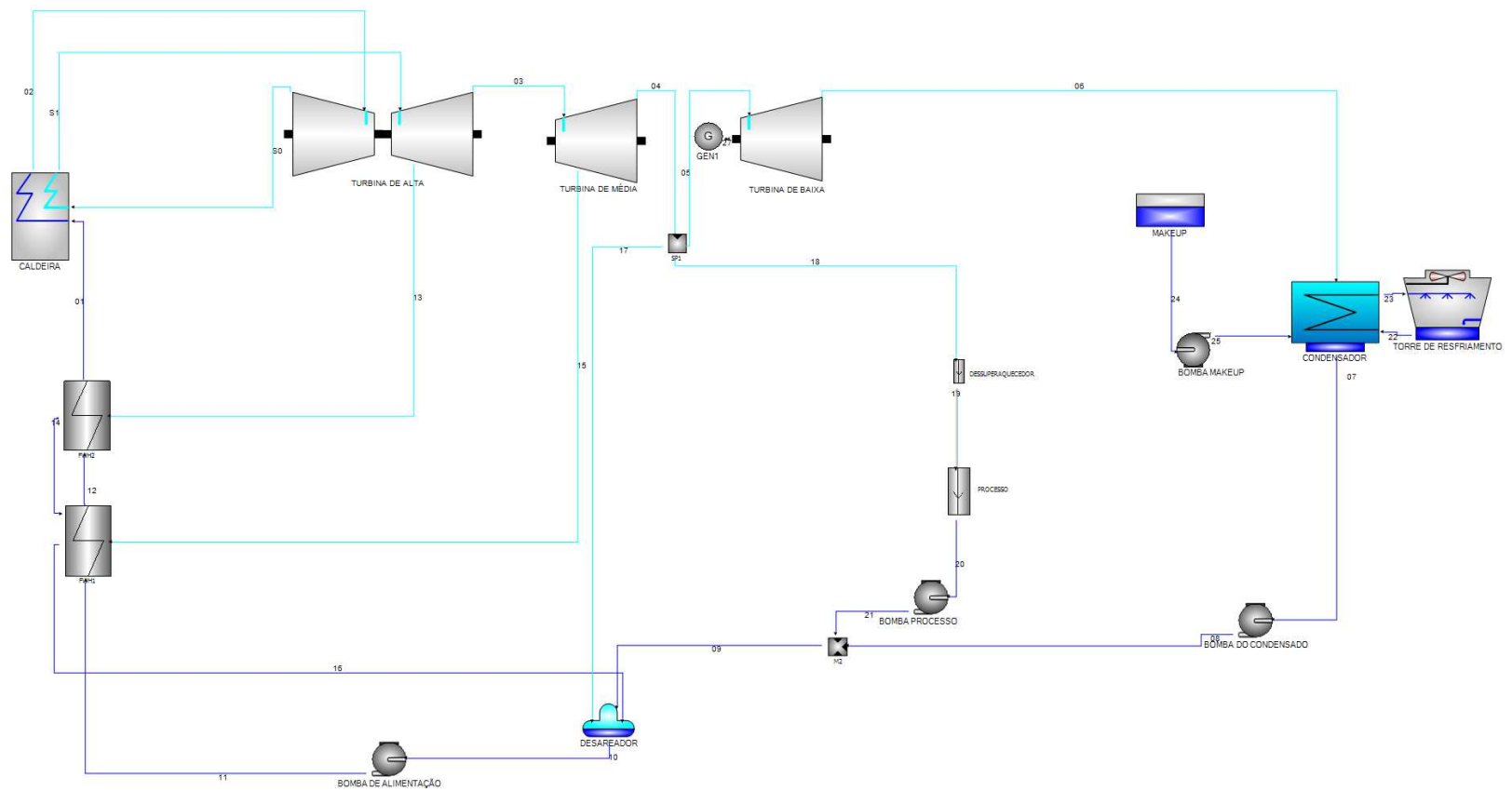
Anexo AI. 9 — Cenário com sete (7) Regeneradores



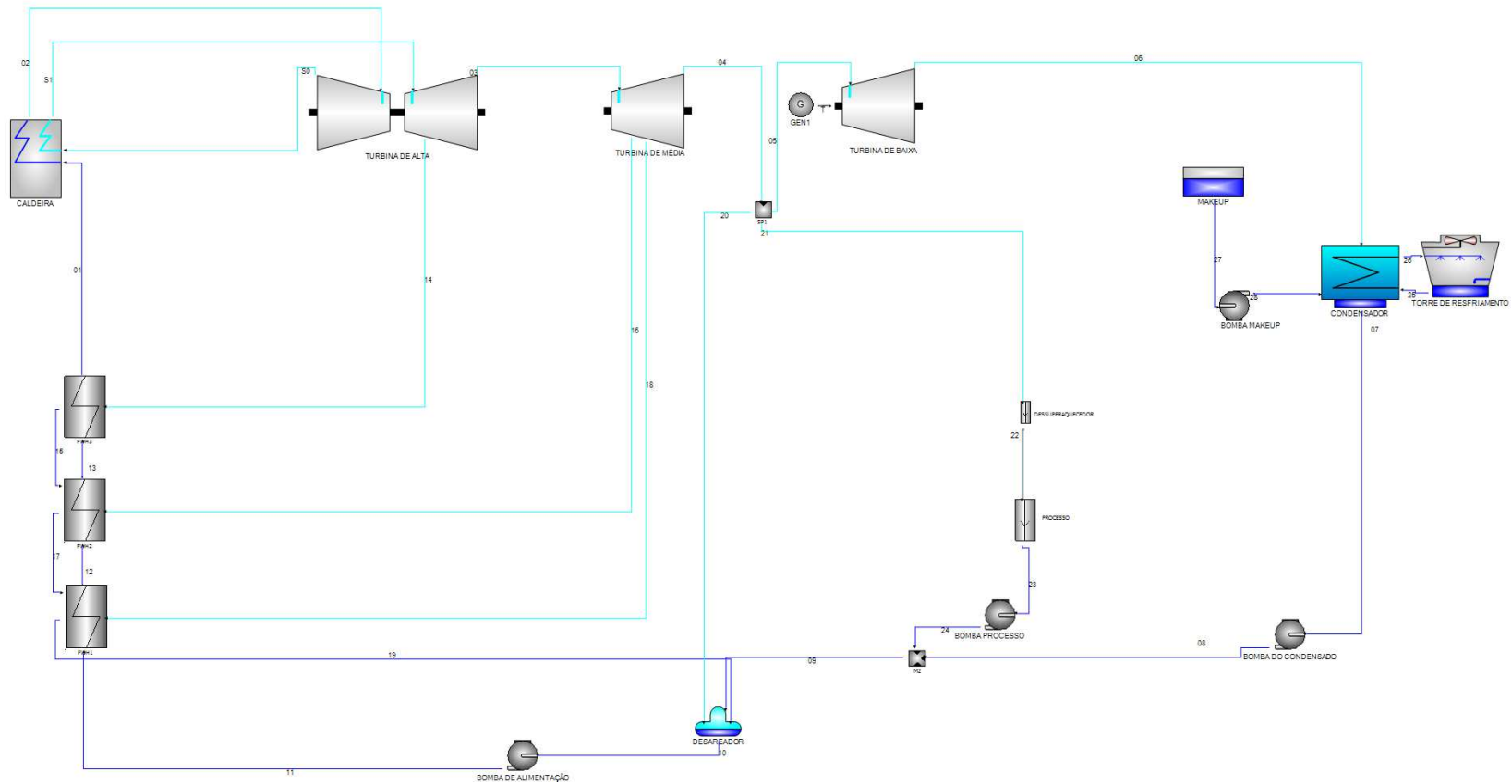
Anexo AI. 10 — Cenário com oito (8) Regeneradores



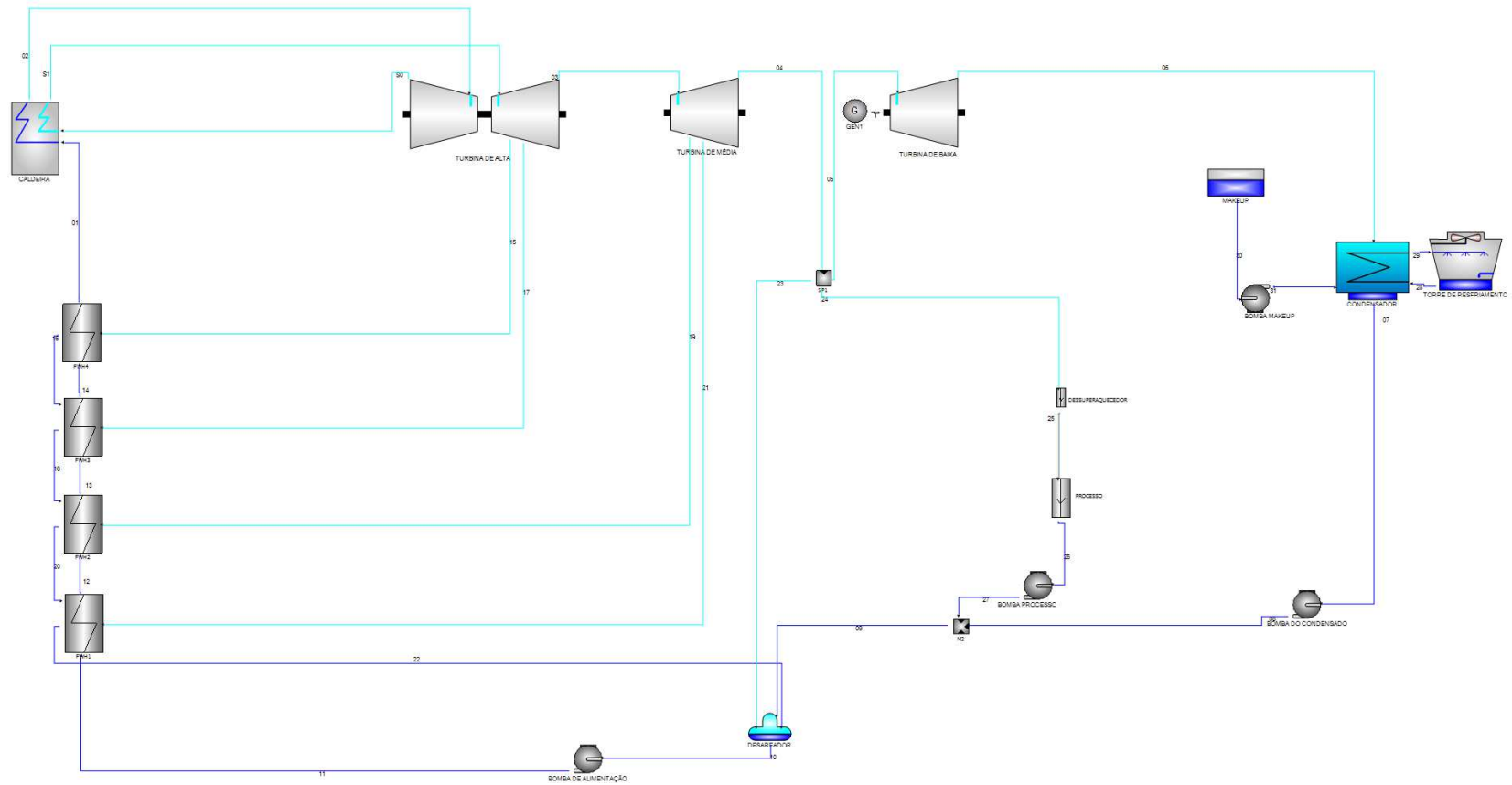
Anexo AI. 11 — Cenário com reaquecimento e um (1) Regenerador



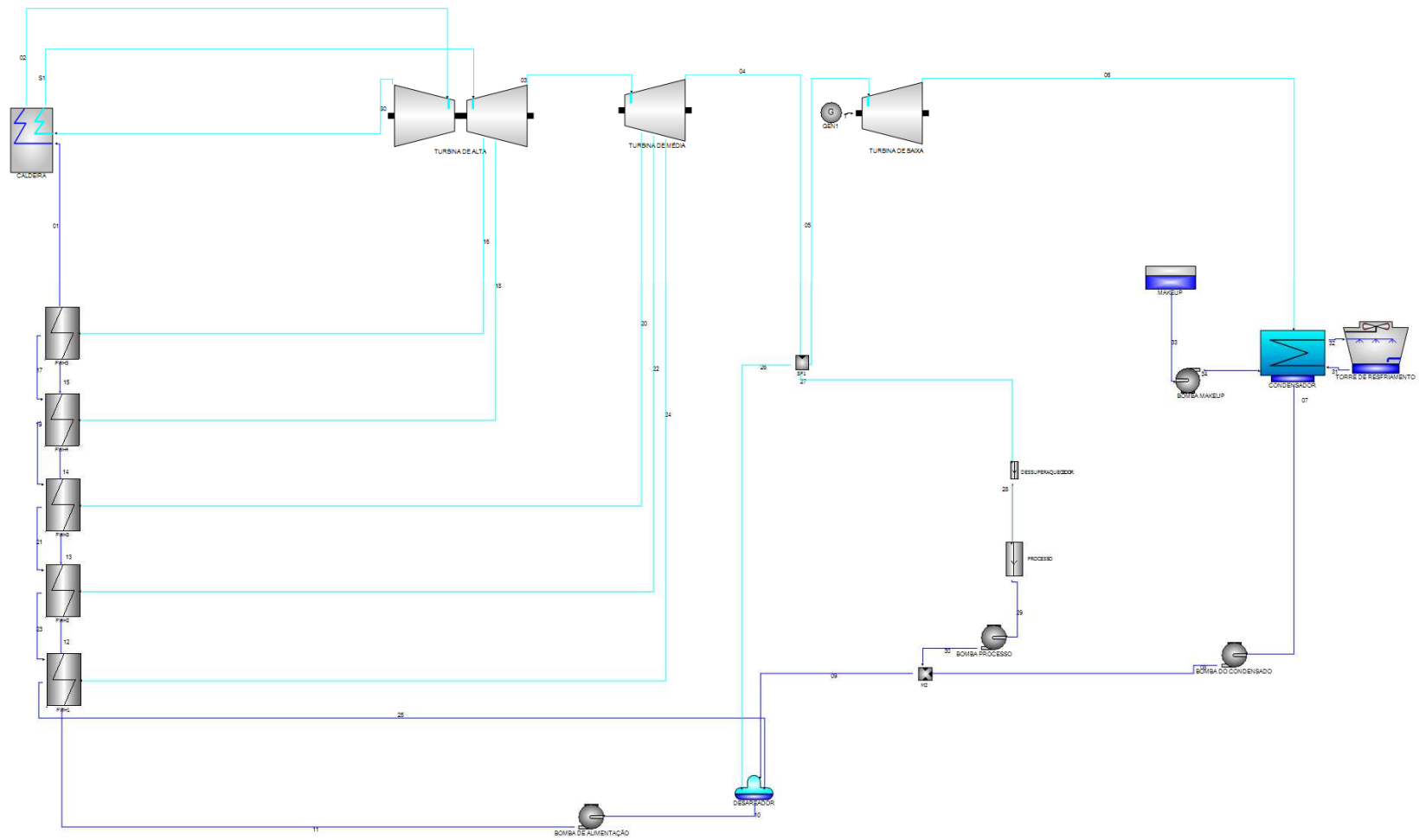
Anexo AI. 12 — Cenário com rea aquecimento e dois (2) Regeneradores



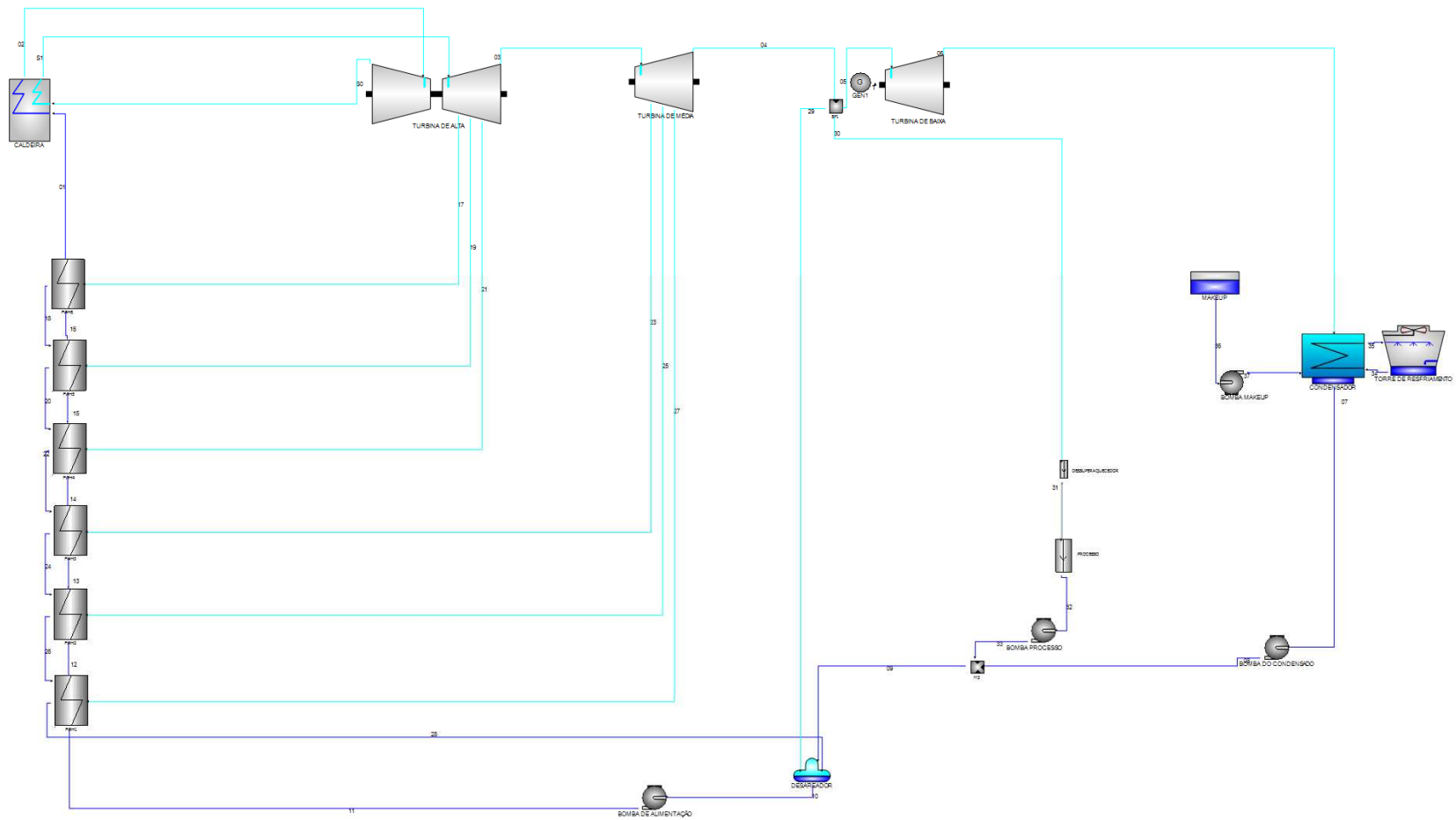
Anexo AI. 13 — Cenário com rea aquecimento e três (3) Regeneradores



Anexo AI. 14 — Cenário com reaquecimento e quatro (4) Regeneradores

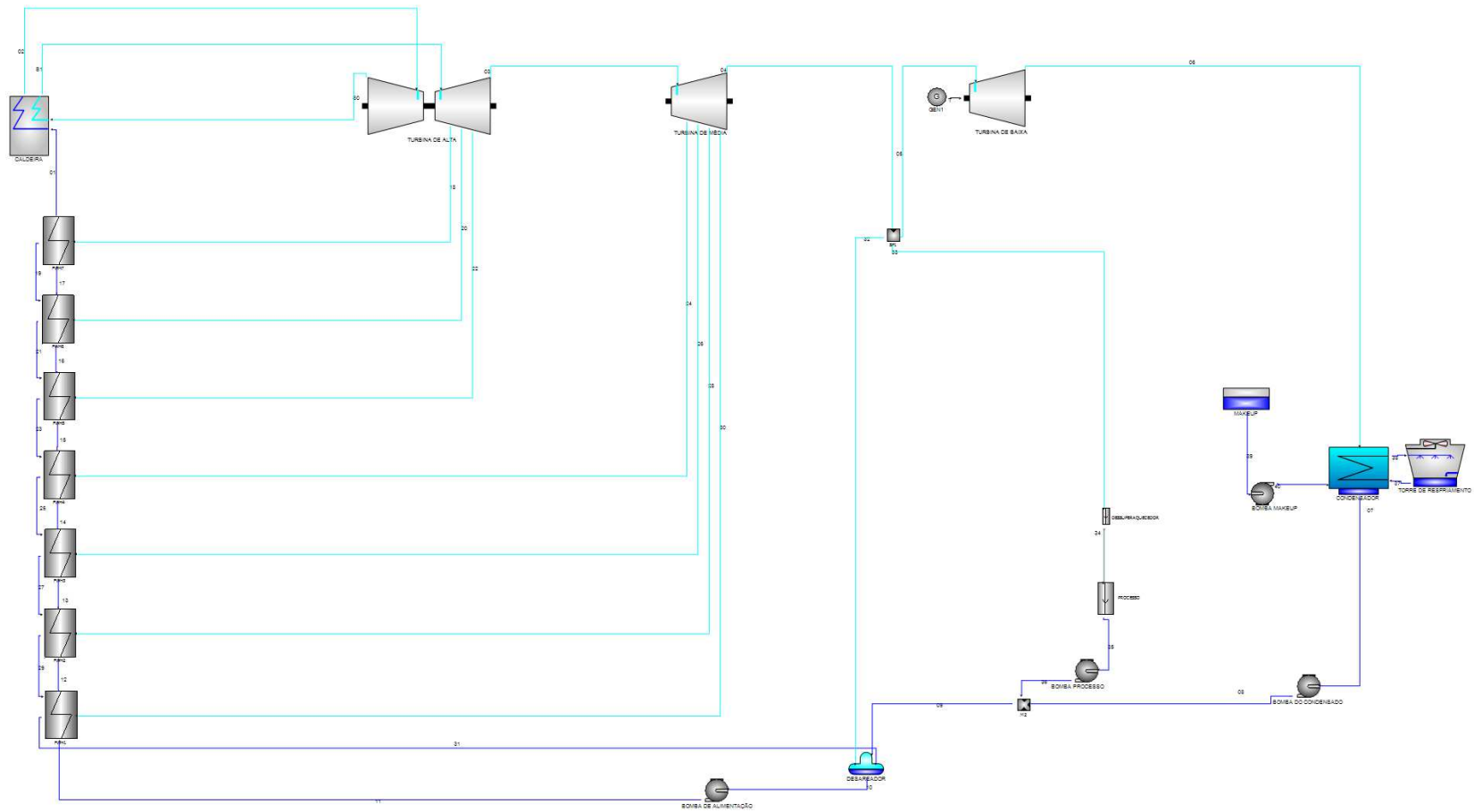


Anexo AI. 15 — Cenário com rea aquecimento e cinco (5) Regeneradores

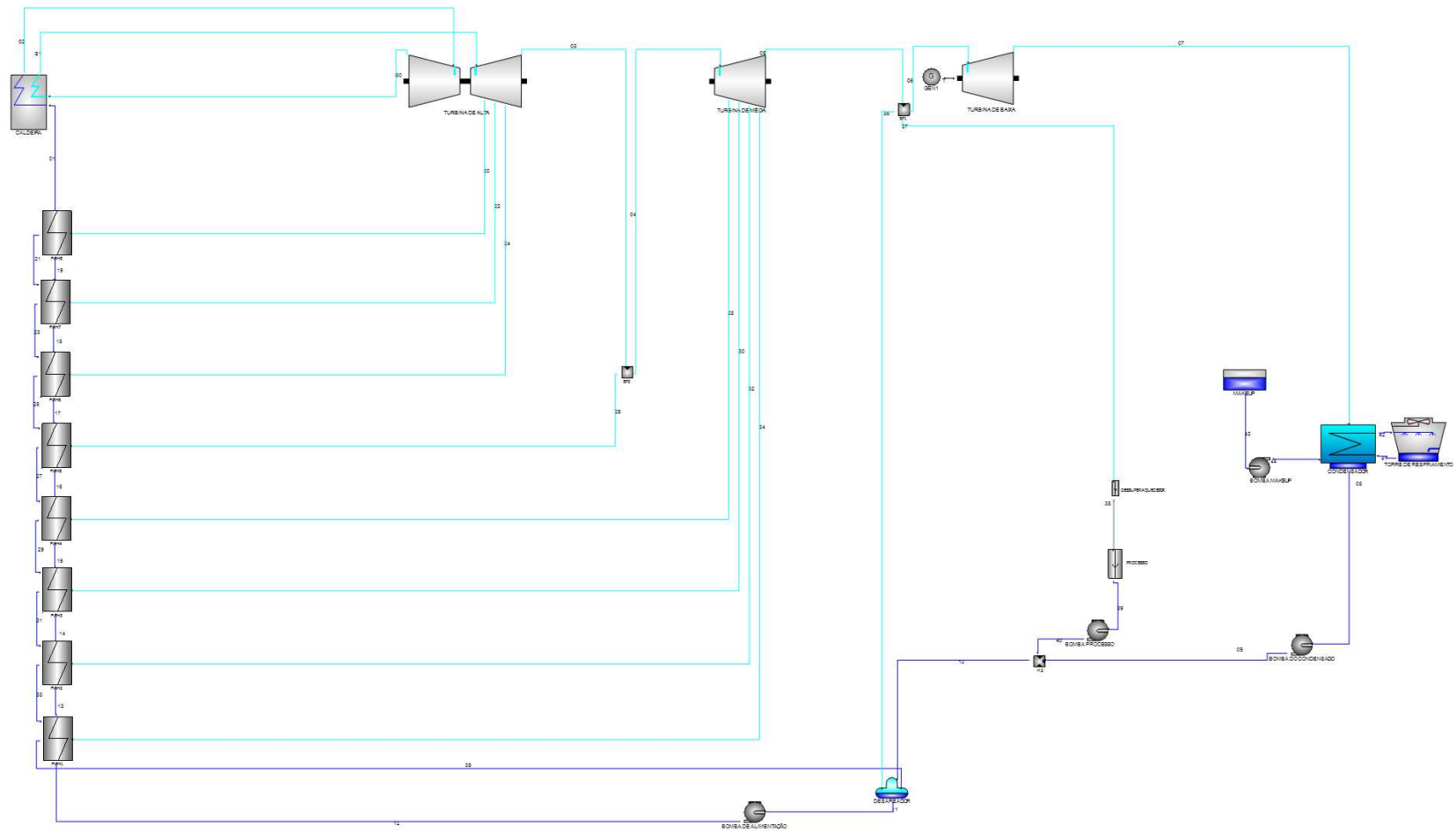


Anexo AI. 16 — Cenário com reaquecimento e seis (6) Regeneradores





Anexo AI. 17 — Cenário com reaquecimento e sete (7) Regeneradores



Anexo AI. 18 — Cenário com rea aquecimento e oito (8) Regeneradores

## Anexo AII - Tabelas de propriedades

Anexo AII. 1 — Propriedades do cenário Base (Convencional)

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 78,2            | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,0               |
| 02    | 78,2            | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 78,2            | 8300,0           | 791,8       | 3442,1              | 6,77                | 1429,7             |
| 04    | 78,2            | 250,0            | 410,8       | 2738,9              | 7,11                | 624,3              |
| 05    | 9,9             | 250,0            | 410,8       | 2738,9              | 7,11                | 624,3              |
| 06    | 9,9             | 10,0             | 319,0       | 2316,7              | 7,31                | 141,6              |
| 07    | 9,9             | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 9,9             | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,1                |
| 09    | 72,4            | 250,0            | 347,7       | 312,2               | 1,01                | 15,7               |
| 10    | 78,2            | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 5,8             | 250,0            | 410,8       | 2738,9              | 7,11                | 624,3              |
| 12    | 62,5            | 250,0            | 410,8       | 2738,9              | 7,11                | 624,3              |
| 13    | 62,5            | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 14    | 62,5            | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 15    | 62,5            | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 16    | 454,4           | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 17    | 454,4           | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 2 — Propriedades do cenário com reaquecimento

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 70,76           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 02    | 70,76           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 70,76           | 3950,0           | 684,7       | 3242,5              | 6,82                | 1214,2             |
| 04    | 70,76           | 3950,0           | 793,2       | 3492,3              | 7,16                | 1363,0             |
| 05    | 70,76           | 250,0            | 478,6       | 2879,4              | 7,42                | 670,3              |
| 06    | 3,57            | 250,0            | 478,6       | 2879,4              | 7,42                | 670,3              |
| 07    | 3,57            | 10,0             | 319,0       | 2440,1              | 7,70                | 149,6              |
| 08    | 3,57            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 09    | 3,57            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,1                |
| 10    | 66,07           | 250,0            | 350,4       | 323,6               | 1,04                | 17,3               |
| 11    | 70,76           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 12    | 4,69            | 250,0            | 478,6       | 2879,4              | 7,42                | 670,3              |
| 13    | 62,50           | 250,0            | 478,6       | 2879,4              | 7,42                | 670,3              |
| 14    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 15    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 16    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 17    | 173,07          | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 18    | 173,07          | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 3 — Propriedades do cenário com um (1) Regenerador

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 84,98           | 8500,0           | 476,5       | 870,1               | 2,35                | 173,6              |
| 02    | 84,98           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 84,98           | 1808,3           | 589,7       | 3067,1              | 6,89                | 1018,4             |
| 04    | 72,71           | 1808,3           | 589,7       | 3067,1              | 6,89                | 1018,4             |
| 05    | 72,71           | 250,0            | 402,5       | 2720,7              | 7,06                | 619,4              |
| 06    | 5,14            | 250,0            | 402,5       | 2720,7              | 6,43                | 808,3              |
| 07    | 5,14            | 10,0             | 319,0       | 2316,7              | 7,31                | 141,6              |
| 08    | 5,14            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 09    | 5,14            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 10    | 67,64           | 250,0            | 349,7       | 320,6               | 1,03                | 16,9               |
| 11    | 84,98           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 12    | 84,98           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 13    | 12,27           | 1808,3           | 589,7       | 3067,1              | 6,89                | 1018,4             |
| 14    | 12,27           | 1808,3           | 397,4       | 522,9               | 1,57                | 58,8               |
| 15    | 5,07            | 250,0            | 402,5       | 2720,7              | 7,06                | 619,4              |
| 16    | 62,50           | 250,0            | 402,5       | 2720,7              | 7,06                | 619,4              |
| 17    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 18    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 19    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,4               |
| 20    | 235,17          | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 21    | 235,17          | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 4 — Propriedades do cenário com dois (2) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 88,51           | 8500,0           | 505,1       | 1000,5              | 2,62                | 224,8              |
| 02    | 88,51           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 79,06           | 2200,0           | 611,9       | 3108,1              | 6,87                | 1064,9             |
| 04    | 71,25           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 05    | 3,91            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 06    | 3,91            | 10,0             | 319,0       | 2316,7              | 7,31                | 141,6              |
| 07    | 3,91            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 3,91            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 66,41           | 250,0            | 350,2       | 322,9               | 1,04                | 17,3               |
| 10    | 88,51           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 88,51           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 88,51           | 8500,0           | 447,9       | 743,8               | 2,08                | 128,9              |
| 13    | 9,46            | 3116,9           | 655,4       | 3188,9              | 6,84                | 1153,5             |
| 14    | 9,46            | 3116,9           | 452,9       | 762,8               | 2,13                | 131,3              |
| 15    | 7,81            | 973,1            | 526,4       | 2951,3              | 6,95                | 882,5              |
| 16    | 17,26           | 973,1            | 397,4       | 522,3               | 1,57                | 58,0               |
| 17    | 4,84            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 18    | 62,50           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 19    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 20    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 21    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,4               |
| 22    | 179,07          | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 23    | 179,07          | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 5 — Propriedades do cenário com três (3) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 90,46           | 8500,0           | 519,4       | 1067,9              | 2,75                | 253,0              |
| 02    | 90,46           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 82,80           | 2200,0           | 611,9       | 3108,1              | 6,87                | 1064,9             |
| 04    | 70,46           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 05    | 3,25            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 06    | 3,25            | 10,0             | 319,0       | 2316,7              | 7,31                | 141,6              |
| 07    | 3,25            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 3,25            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 65,75           | 250,0            | 350,5       | 324,2               | 1,04                | 17,4               |
| 10    | 90,46           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 90,46           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 90,46           | 8500,0           | 433,5       | 681,8               | 1,94                | 108,8              |
| 13    | 90,46           | 8500,0           | 476,5       | 870,1               | 2,35                | 173,6              |
| 14    | 7,66            | 3996,7           | 688,0       | 3249,6              | 6,82                | 1219,8             |
| 15    | 7,66            | 3996,7           | 481,5       | 890,8               | 2,41                | 178,2              |
| 16    | 6,64            | 1808,4           | 591,8       | 3071,9              | 6,89                | 1020,8             |
| 17    | 14,29           | 1808,4           | 438,5       | 699,5               | 1,99                | 109,4              |
| 18    | 5,70            | 690,2            | 492,7       | 2889,0              | 6,99                | 810,9              |
| 19    | 20,00           | 690,2            | 397,4       | 522,1               | 1,57                | 57,7               |
| 20    | 4,72            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 21    | 62,50           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 22    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 23    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 24    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 25    | 148,64          | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 26    | 148,64          | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 6 — Propriedades do cenário com quatro (4) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 91,70           | 8500,0           | 528,0       | 1109,3              | 2,83                | 270,8              |
| 02    | 91,70           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 79,55           | 2200,0           | 611,9       | 3108,1              | 6,87                | 1064,9             |
| 04    | 69,96           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 05    | 2,82            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 06    | 2,82            | 10,0             | 319,0       | 2316,7              | 7,31                | 141,6              |
| 07    | 2,82            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 2,82            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 65,32           | 250,0            | 350,7       | 325,1               | 1,05                | 17,6               |
| 10    | 91,70           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 91,70           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 91,70           | 8500,0           | 424,9       | 644,9               | 1,85                | 97,5               |
| 13    | 91,70           | 8500,0           | 459,3       | 793,9               | 2,19                | 146,0              |
| 14    | 91,70           | 8500,0           | 493,7       | 947,7               | 2,51                | 203,6              |
| 15    | 6,46            | 4608,9           | 707,3       | 3285,5              | 6,81                | 1258,9             |
| 16    | 6,46            | 4608,9           | 498,7       | 969,7               | 2,56                | 209,6              |
| 17    | 5,69            | 2527,2           | 628,9       | 3139,7              | 6,86                | 1099,6             |
| 18    | 12,14           | 2527,2           | 464,3       | 813,2               | 2,24                | 148,5              |
| 19    | 5,12            | 1259,5           | 552,9       | 3000,2              | 6,93                | 938,6              |
| 20    | 17,26           | 1259,5           | 429,9       | 662,0               | 1,91                | 97,2               |
| 21    | 4,47            | 554,7            | 472,2       | 2850,9              | 7,00                | 767,2              |
| 22    | 21,74           | 554,7            | 397,4       | 522,0               | 1,57                | 57,6               |
| 23    | 4,64            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 24    | 62,50           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 25    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 26    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 27    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 28    | 129,15          | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 29    | 129,15          | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |



## Anexo AII. 7 — Propriedades do cenário com cinco (5) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 92,60           | 8500,0           | 533,8       | 1137,7              | 2,88                | 283,3              |
| 02    | 92,60           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 82,02           | 2200,0           | 611,9       | 3108,1              | 6,87                | 1064,9             |
| 04    | 69,65           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 05    | 2,56            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 06    | 2,56            | 10,0             | 319,0       | 2316,7              | 7,31                | 141,6              |
| 07    | 2,56            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 2,56            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 65,06           | 250,0            | 350,9       | 325,6               | 1,05                | 17,6               |
| 10    | 92,60           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 92,60           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 92,60           | 8500,0           | 419,5       | 621,4               | 1,80                | 90,6               |
| 13    | 92,60           | 8500,0           | 447,7       | 743,2               | 2,08                | 128,6              |
| 14    | 92,60           | 8500,0           | 476,5       | 870,3               | 2,35                | 173,7              |
| 15    | 92,60           | 8500,0           | 505,2       | 1000,8              | 2,62                | 224,9              |
| 16    | 5,60            | 5060,0           | 720,2       | 3309,4              | 6,81                | 1285,1             |
| 17    | 5,60            | 5060,0           | 510,2       | 1023,6              | 2,67                | 231,9              |
| 18    | 4,98            | 3120,0           | 655,6       | 3189,2              | 6,84                | 1153,8             |
| 19    | 10,58           | 3120,0           | 481,5       | 890,7               | 2,41                | 177,6              |
| 20    | 4,55            | 1810,0           | 591,9       | 3072,0              | 6,89                | 1021,0             |
| 21    | 15,13           | 1810,0           | 452,7       | 761,5               | 2,13                | 129,9              |
| 22    | 4,12            | 970,0            | 526,1       | 2950,7              | 6,95                | 881,8              |
| 23    | 19,25           | 970,0            | 424,5       | 638,1               | 1,85                | 89,8               |
| 24    | 3,70            | 480,0            | 458,9       | 2826,3              | 7,02                | 739,1              |
| 25    | 22,95           | 480,0            | 397,4       | 521,9               | 1,57                | 57,5               |
| 26    | 4,59            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 27    | 62,50           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 28    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 29    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 30    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 31    | 117,14          | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 32    | 117,14          | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 8 — Propriedades do cenário com seis (6) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 93,21           | 8500,0           | 537,8       | 1157,4              | 2,92                | 292,0              |
| 02    | 93,21           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 79,77           | 2200,0           | 611,9       | 3108,1              | 6,87                | 1064,9             |
| 04    | 69,39           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 05    | 2,34            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 06    | 2,34            | 10,0             | 319,0       | 2316,7              | 7,31                | 141,6              |
| 07    | 2,34            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 2,34            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 64,84           | 250,0            | 351,0       | 326,1               | 1,05                | 17,7               |
| 10    | 93,21           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 93,21           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 93,21           | 8500,0           | 415,4       | 604,0               | 1,75                | 85,7               |
| 13    | 93,21           | 8500,0           | 439,6       | 707,8               | 2,00                | 117,0              |
| 14    | 93,21           | 8500,0           | 464,2       | 815,4               | 2,23                | 153,6              |
| 15    | 93,21           | 8500,0           | 488,7       | 925,1               | 2,47                | 194,7              |
| 16    | 93,21           | 8500,0           | 513,3       | 1038,9              | 2,69                | 240,8              |
| 17    | 4,93            | 5390,0           | 729,1       | 3325,8              | 6,80                | 1303,0             |
| 18    | 4,93            | 5390,0           | 518,3       | 1062,4              | 2,75                | 248,5              |
| 19    | 4,45            | 3600,0           | 674,2       | 3223,8              | 6,83                | 1191,6             |
| 20    | 9,37            | 3600,0           | 493,7       | 946,5               | 2,52                | 199,6              |
| 21    | 4,06            | 2300,0           | 617,4       | 3118,1              | 6,86                | 1075,9             |
| 22    | 13,44           | 2300,0           | 469,2       | 834,8               | 2,29                | 156,1              |
| 23    | 3,78            | 1400,0           | 564,0       | 3020,7              | 6,92                | 962,2              |
| 24    | 17,21           | 1400,0           | 444,6       | 725,6               | 2,05                | 117,5              |
| 25    | 3,47            | 800,0            | 507,0       | 2915,4              | 6,97                | 841,2              |
| 26    | 20,68           | 800,0            | 420,4       | 620,5               | 1,81                | 84,4               |
| 27    | 3,13            | 430,0            | 449,1       | 2807,9              | 7,02                | 718,1              |
| 28    | 23,82           | 430,0            | 397,4       | 521,9               | 1,57                | 57,5               |
| 29    | 4,55            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 30    | 62,50           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 31    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 32    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 33    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 34    | 107,31          | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 35    | 107,31          | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 9 – Propriedades do cenário com sete (7) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 93,73           | 8500,0           | 540,9       | 1173,0              | 2,95                | 299,0              |
| 02    | 93,73           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 81,60           | 2200,0           | 611,9       | 3108,1              | 6,87                | 1064,9             |
| 04    | 69,22           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 05    | 2,20            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 06    | 2,20            | 10,0             | 319,0       | 2316,7              | 7,31                | 141,6              |
| 07    | 2,20            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 2,20            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 64,70           | 250,0            | 351,1       | 326,4               | 1,05                | 17,7               |
| 10    | 93,73           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 93,73           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 93,73           | 8500,0           | 412,1       | 589,8               | 1,72                | 81,7               |
| 13    | 93,73           | 8500,0           | 433,5       | 681,7               | 1,94                | 108,8              |
| 14    | 93,73           | 8500,0           | 455,0       | 775,0               | 2,15                | 139,5              |
| 15    | 93,73           | 8500,0           | 476,5       | 870,1               | 2,35                | 173,6              |
| 16    | 93,73           | 8500,0           | 498,0       | 967,4               | 2,55                | 211,4              |
| 17    | 93,73           | 8500,0           | 519,4       | 1067,9              | 2,75                | 253,0              |
| 18    | 4,42            | 5658,5           | 735,9       | 3338,6              | 6,80                | 1316,8             |
| 19    | 4,42            | 5658,5           | 524,4       | 1092,0              | 2,80                | 261,3              |
| 20    | 4,01            | 3996,7           | 688,0       | 3249,6              | 6,82                | 1219,8             |
| 21    | 8,43            | 3996,7           | 503,0       | 989,5               | 2,61                | 217,1              |
| 22    | 3,69            | 2737,3           | 638,9       | 3158,2              | 6,85                | 1119,9             |
| 23    | 12,12           | 2737,3           | 481,5       | 890,4               | 2,41                | 177,1              |
| 24    | 3,43            | 1808,4           | 591,8       | 3071,9              | 6,89                | 1020,8             |
| 25    | 15,56           | 1808,4           | 460,0       | 793,8               | 2,20                | 141,1              |
| 26    | 3,23            | 1145,3           | 543,0       | 2981,9              | 6,94                | 917,7              |
| 27    | 18,78           | 1145,3           | 438,5       | 699,1               | 2,00                | 108,7              |
| 28    | 3,05            | 690,0            | 492,7       | 2888,9              | 6,99                | 810,8              |
| 29    | 21,83           | 690,0            | 417,1       | 606,1               | 1,78                | 80,2               |
| 30    | 2,67            | 392,1            | 440,9       | 2792,8              | 7,03                | 700,7              |
| 31    | 24,50           | 392,1            | 397,4       | 521,9               | 1,57                | 57,4               |
| 32    | 4,52            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 33    | 62,50           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 34    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 35    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 36    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 37    | 100,91          | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 38    | 100,91          | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 10 — Propriedades do cenário com oito (8) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 94,11           | 8500,0           | 543,3       | 1185,0              | 2,97                | 304,4              |
| 02    | 94,11           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 83,13           | 2200,0           | 611,9       | 3108,1              | 6,87                | 1064,9             |
| 04    | 79,90           | 2200,0           | 611,9       | 3108,1              | 6,87                | 1064,9             |
| 05    | 69,07           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 06    | 2,07            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 6,43                | 809,3              |
| 07    | 2,07            | 10,0             | 319,0       | 2316,7              | 7,31                | 141,6              |
| 08    | 2,07            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 09    | 2,07            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,1                |
| 10    | 64,57           | 250,0            | 351,1       | 326,6               | 1,05                | 17,8               |
| 11    | 94,11           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 12    | 94,11           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 13    | 94,11           | 8500,0           | 409,7       | 579,7               | 1,69                | 78,9               |
| 14    | 94,11           | 8500,0           | 428,8       | 661,2               | 1,89                | 102,5              |
| 15    | 94,11           | 8500,0           | 447,9       | 743,8               | 2,08                | 128,8              |
| 16    | 94,11           | 8500,0           | 466,9       | 827,6               | 2,26                | 158,0              |
| 17    | 94,11           | 8500,0           | 486,4       | 914,6               | 2,44                | 190,6              |
| 18    | 94,11           | 8500,0           | 505,1       | 1000,5              | 2,62                | 224,8              |
| 19    | 94,11           | 8500,0           | 524,2       | 1090,8              | 2,79                | 262,8              |
| 20    | 4,01            | 5871,4           | 741,2       | 3348,3              | 6,79                | 1327,4             |
| 21    | 4,01            | 5871,4           | 529,2       | 1115,3              | 2,85                | 271,6              |
| 22    | 3,65            | 4328,6           | 698,8       | 3269,6              | 6,82                | 1241,6             |
| 23    | 7,66            | 4328,6           | 510,1       | 1023,3              | 2,67                | 231,3              |
| 24    | 3,32            | 3117,0           | 655,4       | 3188,9              | 6,84                | 1153,5             |
| 25    | 10,98           | 3117,0           | 491,4       | 935,7               | 2,50                | 195,0              |
| 26    | 3,23            | 2200,0           | 611,9       | 3108,1              | 6,87                | 1064,9             |
| 27    | 14,21           | 2200,0           | 471,9       | 847,1               | 2,32                | 160,6              |
| 28    | 2,98            | 1484,4           | 570,3       | 3032,3              | 6,91                | 975,4              |
| 29    | 17,19           | 1484,4           | 452,9       | 762,0               | 2,14                | 129,8              |
| 30    | 2,82            | 973,1            | 526,4       | 2951,3              | 6,95                | 882,5              |
| 31    | 20,01           | 973,1            | 433,8       | 678,3               | 1,95                | 102,0              |
| 32    | 2,69            | 612,0            | 481,3       | 2867,9              | 7,00                | 786,7              |
| 33    | 22,70           | 612,0            | 414,7       | 595,8               | 1,75                | 77,2               |
| 34    | 2,34            | 366,7            | 435,1       | 2781,9              | 7,04                | 688,3              |
| 35    | 25,04           | 366,7            | 397,4       | 521,9               | 1,57                | 57,4               |
| 36    | 4,50            | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 37    | 62,50           | 250,0            | 402,7       | 2721,2              | 7,06                | 619,6              |
| 38    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 39    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 40    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 41    | 94,94           | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 42    | 94,94           | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 11 — Propriedades do cenário com reaquecimento e um (1) Regenerador

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 79,07           | 8500,0           | 476,5       | 870,1               | 2,35                | 173,6              |
| 02    | 79,07           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 79,07           | 1808,4           | 652,2       | 3205,7              | 7,11                | 1090,4             |
| 04    | 68,24           | 1808,4           | 652,2       | 3205,7              | 7,11                | 1090,4             |
| 05    | 68,24           | 250,0            | 448,8       | 2818,5              | 7,29                | 648,6              |
| 06    | 1,35            | 250,0            | 448,8       | 2818,5              | 6,11                | 1000,2             |
| 07    | 1,35            | 10,0             | 319,0       | 2394,3              | 7,55                | 146,7              |
| 08    | 1,35            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 09    | 1,35            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,1                |
| 10    | 63,85           | 250,0            | 351,5       | 328,2               | 1,06                | 18,0               |
| 11    | 79,07           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 12    | 79,07           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 13    | 10,83           | 1808,4           | 652,2       | 3205,7              | 7,11                | 1090,4             |
| 14    | 10,83           | 1808,4           | 397,4       | 522,9               | 1,57                | 58,8               |
| 15    | 4,39            | 250,0            | 448,8       | 2818,5              | 7,29                | 648,6              |
| 16    | 62,50           | 250,0            | 448,8       | 2818,5              | 7,29                | 648,6              |
| 17    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 18    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 19    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 20    | 64,17           | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 21    | 64,17           | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |

## Anexo AII. 12 — Propriedades do cenário com reaquecimento e dois (2) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 82,79           | 8500,0           | 505,1       | 1000,5              | 2,62                | 224,8              |
| 02    | 82,79           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 74,43           | 2200,0           | 670,5       | 3239,2              | 7,07                | 1135,0             |
| 04    | 67,41           | 250,0            | 445,1       | 2811,0              | 7,28                | 646,1              |
| 05    | 0,65            | 250,0            | 445,1       | 2811,0              | 7,28                | 646,1              |
| 06    | 0,65            | 10,0             | 319,0       | 2388,6              | 7,54                | 146,3              |
| 07    | 0,65            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 0,65            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 63,15           | 250,0            | 351,8       | 329,7               | 1,06                | 18,2               |
| 10    | 82,79           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 82,79           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 82,79           | 8500,0           | 447,9       | 743,8               | 2,08                | 128,8              |
| 13    | 8,36            | 3117,0           | 717,2       | 3329,7              | 7,05                | 1233,1             |
| 14    | 8,36            | 3117,0           | 452,9       | 762,8               | 2,13                | 131,3              |
| 15    | 7,02            | 973,1            | 579,0       | 3064,9              | 7,16                | 934,7              |
| 16    | 15,38           | 973,1            | 397,4       | 522,3               | 1,57                | 58,0               |
| 17    | 4,25            | 250,0            | 445,1       | 2811,0              | 7,28                | 646,1              |
| 18    | 62,50           | 250,0            | 445,1       | 2811,0              | 7,28                | 646,1              |
| 19    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 20    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 21    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 22    | 30,84           | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 23    | 30,84           | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |
| 24    | 0,00            | 100,0            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 25    | 0,00            | 250,0            | 298,2       | 105,2               | 0,37                | 0,1                |
| S0    | 82,79           | 5400,0           | 727,7       | 3322,4              | 6,79                | 1301,2             |
| S1    | 82,79           | 5400,0           | 793,2       | 3477,0              | 7,00                | 1395,1             |

## Anexo AII. 13 — Propriedades do cenário com reaquecimento e três (3) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 85,32           | 8500,0           | 519,4       | 1067,9              | 2,75                | 253,0              |
| 02    | 85,32           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 78,45           | 2200             | 661,1       | 3218,3              | 7,04                | 1123,5             |
| 04    | 67,21           | 250,0            | 438,5       | 2797,2              | 7,25                | 641,6              |
| 05    | 0,49            | 250,0            | 438,5       | 2797,2              | 7,25                | 641,6              |
| 06    | 0,49            | 10,0             | 319,0       | 2377,9              | 7,50                | 145,6              |
| 07    | 0,49            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 0,49            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 62,99           | 250,0            | 351,9       | 330,0               | 1,06                | 18,3               |
| 10    | 85,32           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 85,32           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 85,32           | 8500,0           | 433,5       | 681,8               | 1,94                | 108,8              |
| 13    | 85,32           | 8500,0           | 476,5       | 870,1               | 2,35                | 173,6              |
| 14    | 6,87            | 3996,7           | 741,7       | 3373,9              | 7,00                | 1292,2             |
| 15    | 6,87            | 3996,7           | 481,5       | 890,8               | 2,41                | 178,2              |
| 16    | 6,02            | 1808,4           | 640,0       | 3178,7              | 7,07                | 1075,9             |
| 17    | 12,88           | 1808,4           | 438,5       | 699,5               | 1,99                | 109,4              |
| 18    | 5,22            | 690,1            | 534,7       | 2978,9              | 7,16                | 848,6              |
| 19    | 18,11           | 690,1            | 397,4       | 522,1               | 1,57                | 57,7               |
| 20    | 4,23            | 250,0            | 438,5       | 2797,2              | 7,25                | 641,6              |
| 21    | 62,50           | 250,0            | 438,5       | 2797,2              | 7,25                | 641,6              |
| 22    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 23    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 24    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 25    | 22,98           | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 26    | 22,98           | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |
| 27    | 0,00            | 100,0            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 28    | 0,00            | 250,0            | 298,2       | 105,2               | 0,37                | 0,1                |
| S0    | 85,32           | 5800,0           | 737,9       | 3341,5              | 6,79                | 1321,8             |
| S1    | 85,32           | 5800,0           | 793,2       | 3472,7              | 6,96                | 1401,9             |

Anexo AII. 14 — Propriedades do cenário com reaquecimento e quatro (4)  
Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 86,53           | 8500,0           | 528,0       | 1109,3              | 2,83                | 270,8              |
| 02    | 86,53           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 75,60           | 2200             | 660,0       | 3215,8              | 7,04                | 1122,1             |
| 04    | 66,82           | 250,0            | 437,7       | 2795,5              | 7,24                | 641,1              |
| 05    | 0,16            | 250,0            | 437,7       | 2795,5              | 7,24                | 641,1              |
| 06    | 0,16            | 10,0             | 319,0       | 2376,6              | 7,50                | 145,5              |
| 07    | 0,16            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 0,16            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 62,66           | 250,0            | 352,1       | 330,8               | 1,06                | 18,4               |
| 10    | 86,53           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 86,53           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 86,53           | 8500,0           | 424,9       | 644,9               | 1,85                | 97,5               |
| 13    | 86,53           | 8500,0           | 459,3       | 793,9               | 2,19                | 146,0              |
| 14    | 86,53           | 8500,0           | 493,7       | 947,7               | 2,51                | 203,6              |
| 15    | 5,78            | 4608,9           | 760,7       | 3410,4              | 6,98                | 1333,1             |
| 16    | 5,78            | 4608,9           | 498,7       | 969,7               | 2,56                | 209,6              |
| 17    | 5,14            | 2527,2           | 678,0       | 3250,5              | 7,03                | 1159,8             |
| 18    | 10,93           | 2527,2           | 464,3       | 813,2               | 2,24                | 148,5              |
| 19    | 4,67            | 1259,5           | 597,7       | 3098,1              | 7,10                | 985,7              |
| 20    | 15,60           | 1259,5           | 429,9       | 662,0               | 1,91                | 97,2               |
| 21    | 4,11            | 554,7            | 511,9       | 2935,5              | 7,18                | 800,5              |
| 22    | 19,71           | 554,7            | 397,4       | 522,0               | 1,57                | 57,6               |
| 23    | 4,17            | 250,0            | 437,7       | 2795,5              | 7,24                | 641,1              |
| 24    | 62,50           | 250,0            | 437,7       | 2795,5              | 7,24                | 641,1              |
| 25    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 26    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 27    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 28    | 7,30            | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 29    | 7,30            | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |
| 30    | 0,00            | 100,0            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 31    | 0,00            | 250,0            | 298,2       | 105,2               | 0,37                | 0,1                |
| S0    | 86,53           | 5850,0           | 739,2       | 3343,8              | 6,79                | 1324,3             |
| S1    | 86,53           | 5850,0           | 793,2       | 3472,2              | 6,96                | 1402,7             |



Anexo AII. 15 — Propriedades do cenário com reaquecimento e cinco (5)  
Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 87,87           | 8500,0           | 533,8       | 1137,7              | 2,88                | 283,3              |
| 02    | 87,87           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 78,26           | 2200,0           | 654,5       | 3203,6              | 7,02                | 1115,4             |
| 04    | 66,85           | 250,0            | 433,8       | 2787,4              | 7,22                | 638,5              |
| 05    | 0,18            | 250,0            | 433,8       | 2787,4              | 7,22                | 638,5              |
| 06    | 0,18            | 10,0             | 319,0       | 2370,3              | 7,48                | 145,1              |
| 07    | 0,18            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 0,18            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 62,68           | 250,0            | 352,1       | 330,7               | 1,06                | 18,4               |
| 10    | 87,87           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 87,87           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 87,87           | 8500,0           | 419,5       | 621,4               | 1,80                | 90,6               |
| 13    | 87,87           | 8500,0           | 447,7       | 743,2               | 2,08                | 128,6              |
| 14    | 87,87           | 8500,0           | 476,5       | 870,3               | 2,35                | 173,7              |
| 15    | 87,87           | 8500,0           | 505,2       | 1000,8              | 2,62                | 224,9              |
| 16    | 5,06            | 5060,0           | 768,1       | 3422,2              | 6,96                | 1352,7             |
| 17    | 5,06            | 5060,0           | 510,2       | 1023,6              | 2,67                | 231,9              |
| 18    | 4,54            | 3120,0           | 700,4       | 3291,8              | 6,99                | 1211,2             |
| 19    | 9,60            | 3120,0           | 481,5       | 890,7               | 2,41                | 177,6              |
| 20    | 4,18            | 1810,0           | 633,6       | 3164,7              | 7,05                | 1068,6             |
| 21    | 13,78           | 1810,0           | 452,7       | 761,5               | 2,13                | 129,9              |
| 22    | 3,80            | 970,0            | 564,4       | 3033,7              | 7,11                | 919,4              |
| 23    | 17,59           | 970,0            | 424,5       | 638,1               | 1,85                | 89,8               |
| 24    | 3,44            | 480,0            | 493,4       | 2899,7              | 7,17                | 766,5              |
| 25    | 21,02           | 480,0            | 397,4       | 521,9               | 1,57                | 57,5               |
| 26    | 4,17            | 250,0            | 433,8       | 2787,4              | 7,22                | 638,5              |
| 27    | 62,50           | 250,0            | 433,8       | 2787,4              | 7,22                | 638,5              |
| 28    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 29    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 30    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 31    | 8,35            | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 32    | 8,35            | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |
| 33    | 0,00            | 100,0            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 34    | 0,00            | 250,0            | 298,2       | 105,2               | 0,37                | 0,1                |
| S0    | 87,87           | 6100,0           | 745,3       | 3355,2              | 6,79                | 1336,5             |
| S1    | 87,87           | 6100,0           | 793,2       | 3469,5              | 6,93                | 1406,5             |

## Anexo AII. 16 — Propriedades do cenário com reaquecimento e seis (6) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 88,53           | 8500,0           | 537,8       | 1157,4              | 2,92                | 292,0              |
| 02    | 88,53           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 76,29           | 2200             | 653,4       | 3201,2              | 7,02                | 1114,1             |
| 04    | 66,68           | 250,0            | 433,0       | 2785,8              | 7,22                | 638,1              |
| 05    | 0,04            | 250,0            | 433,0       | 2785,8              | 7,22                | 638,1              |
| 06    | 0,04            | 10,0             | 319,0       | 2369,1              | 7,47                | 145,0              |
| 07    | 0,04            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 0,04            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 62,54           | 250,0            | 352,2       | 331,0               | 1,06                | 18,4               |
| 10    | 88,53           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 88,53           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 88,53           | 8500,0           | 415,4       | 604,0               | 1,75                | 85,7               |
| 13    | 88,53           | 8500,0           | 439,6       | 707,8               | 2,00                | 117,0              |
| 14    | 88,53           | 8500,0           | 464,2       | 815,4               | 2,23                | 153,6              |
| 15    | 88,53           | 8500,0           | 488,7       | 925,1               | 2,47                | 194,7              |
| 16    | 88,53           | 8500,0           | 513,3       | 1038,9              | 2,69                | 240,8              |
| 17    | 4,46            | 5390,0           | 776,1       | 3437,2              | 6,95                | 1370,2             |
| 18    | 4,46            | 5390,0           | 518,3       | 1062,4              | 2,75                | 248,5              |
| 19    | 4,06            | 3600,0           | 718,8       | 3326,8              | 6,98                | 1250,5             |
| 20    | 8,52            | 3600,0           | 493,7       | 946,5               | 2,52                | 199,6              |
| 21    | 3,72            | 2300,0           | 659,1       | 3212,2              | 7,01                | 1126,0             |
| 22    | 12,24           | 2300,0           | 469,2       | 834,8               | 2,29                | 156,1              |
| 23    | 3,48            | 1400,0           | 603,4       | 3107,1              | 7,07                | 1004,4             |
| 24    | 15,72           | 1400,0           | 444,6       | 725,6               | 2,05                | 117,5              |
| 25    | 3,22            | 800,0            | 543,3       | 2993,6              | 7,12                | 875,0              |
| 26    | 18,94           | 800,0            | 420,4       | 620,5               | 1,81                | 84,4               |
| 27    | 2,92            | 430,0            | 482,1       | 2878,2              | 7,18                | 743,3              |
| 28    | 21,85           | 430,0            | 397,4       | 521,9               | 1,57                | 57,5               |
| 29    | 4,14            | 250,0            | 433,0       | 2785,8              | 7,22                | 638,1              |
| 30    | 62,50           | 250,0            | 433,0       | 2785,8              | 7,22                | 638,1              |
| 31    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 32    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 33    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 34    | 1,78            | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 35    | 1,78            | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |
| 36    | 0,00            | 100,0            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 37    | 0,00            | 250,0            | 298,2       | 105,2               | 0,37                | 0,1                |
| S0    | 88,53           | 6150,0           | 746,5       | 3357,4              | 6,79                | 1338,9             |
| S1    | 88,53           | 6150,0           | 793,2       | 3468,9              | 6,93                | 1407,2             |

## Anexo AII. 17 — Propriedades do cenário com reaquecimento e sete (7) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 89,34           | 8500,0           | 540,9       | 1173,0              | 2,95                | 299,0              |
| 02    | 89,34           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 78,24           | 2200             | 650,3       | 3194,3              | 7,00                | 1110,4             |
| 04    | 66,72           | 250,0            | 430,7       | 2781,1              | 7,21                | 636,6              |
| 05    | 0,07            | 250,0            | 430,7       | 2781,1              | 7,21                | 636,6              |
| 06    | 0,07            | 10,0             | 319,0       | 2365,4              | 7,46                | 144,8              |
| 07    | 0,07            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 08    | 0,07            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,0                |
| 09    | 62,57           | 250,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,4               |
| 10    | 89,34           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 11    | 89,34           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 12    | 89,34           | 8500,0           | 412,1       | 589,8               | 1,72                | 81,7               |
| 13    | 89,34           | 8500,0           | 433,5       | 681,7               | 1,94                | 108,8              |
| 14    | 89,34           | 8500,0           | 455,0       | 775,0               | 2,15                | 139,5              |
| 15    | 89,34           | 8500,0           | 476,5       | 870,1               | 2,35                | 173,6              |
| 16    | 89,34           | 8500,0           | 498,0       | 967,4               | 2,55                | 211,4              |
| 17    | 89,34           | 8500,0           | 519,4       | 1067,9              | 2,75                | 253,0              |
| 18    | 4,03            | 5658,5           | 779,7       | 3442,5              | 6,93                | 1379,9             |
| 19    | 4,03            | 5658,5           | 524,4       | 1092,0              | 2,80                | 261,3              |
| 20    | 3,67            | 3996,7           | 729,9       | 3346,9              | 6,96                | 1276,1             |
| 21    | 7,70            | 3996,7           | 503,0       | 989,5               | 2,61                | 217,1              |
| 22    | 3,40            | 2737,3           | 678,6       | 3248,4              | 6,99                | 1169,2             |
| 23    | 11,10           | 2737,3           | 481,5       | 890,4               | 2,41                | 177,1              |
| 24    | 3,18            | 1808,4           | 629,4       | 3155,5              | 7,03                | 1063,5             |
| 25    | 14,28           | 1808,4           | 460,0       | 793,8               | 2,20                | 141,1              |
| 26    | 3,00            | 1145,3           | 578,4       | 3059,1              | 7,08                | 953,8              |
| 27    | 17,28           | 1145,3           | 438,5       | 699,1               | 2,00                | 108,7              |
| 28    | 2,84            | 690,0            | 525,6       | 2959,5              | 7,12                | 840,1              |
| 29    | 20,12           | 690,0            | 417,1       | 606,1               | 1,78                | 80,2               |
| 30    | 2,50            | 392,1            | 471,0       | 2856,9              | 7,17                | 722,9              |
| 31    | 22,62           | 392,1            | 397,4       | 521,9               | 1,57                | 57,4               |
| 32    | 4,15            | 250,0            | 430,7       | 2781,1              | 7,21                | 636,6              |
| 33    | 62,50           | 250,0            | 430,7       | 2781,1              | 7,21                | 636,6              |
| 34    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 35    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 36    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 37    | 3,50            | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 38    | 3,50            | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |
| 39    | 0,00            | 100,0            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 40    | 0,00            | 250,0            | 298,2       | 105,2               | 0,37                | 0,1                |
| S0    | 89,34           | 6300,0           | 750,0       | 3364,0              | 6,78                | 1346,0             |
| S1    | 89,34           | 6300,0           | 793,2       | 3467,3              | 6,92                | 1409,4             |

## Anexo AII. 18 — Propriedades do cenário com reaquecimento e oito (8) Regeneradores

| Linha | Fluxo<br>[kg/s] | Pressão<br>[kPa] | Temp<br>[K] | Entalpia<br>[kJ/kg] | Entropia<br>[kJ/kg] | Exergia<br>[kJ/kg] |
|-------|-----------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 01    | 89,95           | 8500,0           | 543,3       | 1185,0              | 2,97                | 304,4              |
| 02    | 89,95           | 8500,0           | 793,2       | 3443,2              | 6,76                | 1433,4             |
| 03    | 79,86           | 2200,0           | 648,2       | 3189,7              | 7,00                | 1107,9             |
| 04    | 76,86           | 2200,0           | 648,2       | 3189,7              | 7,00                | 1107,9             |
| 05    | 66,74           | 250,0            | 429,3       | 2778,1              | 7,20                | 635,7              |
| 06    | 0,09            | 250,0            | 429,3       | 2778,1              | 6,24                | 922,8              |
| 07    | 0,09            | 10,0             | 319,0       | 2363,0              | 7,46                | 144,6              |
| 08    | 0,09            | 10,0             | 319,0       | 191,9               | 0,65                | 2,8                |
| 09    | 0,09            | 250,0            | 319,0       | 192,3               | 0,65                | 3,1                |
| 10    | 62,59           | 250,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,4               |
| 11    | 89,95           | 250,0            | 390,6       | 492,9               | 1,50                | 50,3               |
| 12    | 89,95           | 8500,0           | 392,4       | 506,4               | 1,51                | 60,1               |
| 13    | 89,95           | 8500,0           | 409,7       | 579,7               | 1,69                | 78,9               |
| 14    | 89,95           | 8500,0           | 428,8       | 661,2               | 1,89                | 102,5              |
| 15    | 89,95           | 8500,0           | 447,9       | 743,8               | 2,08                | 128,8              |
| 16    | 89,95           | 8500,0           | 466,9       | 827,6               | 2,26                | 158,0              |
| 17    | 89,95           | 8500,0           | 486,4       | 914,6               | 2,44                | 190,6              |
| 18    | 89,95           | 8500,0           | 505,1       | 1000,5              | 2,62                | 224,8              |
| 19    | 89,95           | 8500,0           | 524,2       | 1090,8              | 2,79                | 262,8              |
| 20    | 3,67            | 5871,4           | 782,8       | 3447,5              | 6,92                | 1387,8             |
| 21    | 3,67            | 5871,4           | 529,2       | 1115,3              | 2,85                | 271,6              |
| 22    | 3,36            | 4328,6           | 738,9       | 3363,2              | 6,95                | 1296,4             |
| 23    | 7,03            | 4328,6           | 510,1       | 1023,3              | 2,67                | 231,3              |
| 24    | 3,07            | 3117,0           | 693,7       | 3276,6              | 6,97                | 1202,4             |
| 25    | 10,10           | 3117,0           | 491,4       | 935,7               | 2,50                | 195,0              |
| 26    | 2,99            | 2200,0           | 648,2       | 3189,7              | 7,00                | 1107,9             |
| 27    | 13,09           | 2200,0           | 471,9       | 847,1               | 2,32                | 160,6              |
| 28    | 2,77            | 1484,4           | 605,0       | 3108,8              | 7,04                | 1013,1             |
| 29    | 15,86           | 1484,4           | 452,9       | 762,0               | 2,14                | 129,8              |
| 30    | 2,64            | 973,1            | 559,1       | 3022,3              | 7,09                | 914,5              |
| 31    | 18,50           | 973,1            | 433,8       | 678,3               | 1,95                | 102,0              |
| 32    | 2,52            | 612,0            | 511,9       | 2933,4              | 7,13                | 812,9              |
| 33    | 21,02           | 612,0            | 414,7       | 595,8               | 1,75                | 77,2               |
| 34    | 2,20            | 366,7            | 463,3       | 2842,0              | 7,17                | 708,5              |
| 35    | 23,22           | 366,7            | 397,4       | 521,9               | 1,57                | 57,4               |
| 36    | 4,15            | 250,0            | 429,3       | 2778,1              | 7,20                | 635,7              |
| 37    | 62,50           | 250,0            | 429,3       | 2778,1              | 7,20                | 635,7              |
| 38    | 62,50           | 250,0            | 400,6       | 2716,5              | 7,05                | 618,4              |
| 39    | 62,50           | 100,0            | 352,1       | 330,9               | 1,06                | 18,3               |
| 40    | 62,50           | 250,0            | 352,2       | 331,1               | 1,06                | 18,5               |
| 41    | 4,25            | 103,4            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 42    | 4,25            | 103,4            | 309,3       | 151,4               | 0,52                | 0,8                |
| 43    | 0,00            | 100,0            | 298,1       | 104,9               | 0,37                | 0,0                |
| 44    | 0,00            | 250,0            | 298,2       | 105,2               | 0,37                | 0,1                |
| S0    | 89,95           | 6400,0           | 752,3       | 3368,3              | 6,78                | 1350,7             |
| S1    | 89,95           | 6400,0           | 793,2       | 3466,2              | 6,91                | 1410,8             |

## Anexo AIII - Tabelas de balanços exerгéticos nos sistemas de cogeração

Anexo AIII. 1 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário Base

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 362167    | 0     | 4693      | 112075  | 254785      |
| Turbina            | 0         | 56069 | 112075    | 44052   | 11954       |
| Condensador        | 0         | 0     | 1397      | 413     | 985         |
| Bomba Condensador  | 0         | -4    | 28        | 30      | 1           |
| Desaerador         | 0         | 0     | 4770      | 3930    | 840         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1050 | 3930      | 4693    | 288         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 39019     | 38648   | 370         |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1184      | 1133    | 51          |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 385       | 1       | 384         |
| Total              | 362167    | 55000 | 217436    | 254941  | 269662      |

Anexo AIII. 2 — Balanço de exergia global do cenário Base

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quim bagaço+palha | 362167 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -55000 kW  | 15,2%  |
| E calor             | -37505 kW  | 10,4%  |
| E destruída         | -269662 kW | 74,5%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |

### Anexo AIII. 3 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com Reaquecimento

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 355415    | 0     | 90178     | 197888  | 247706      |
| Turbina            | 0         | 55967 | 197888    | 131499  | 10422       |
| Condensador        | 0         | 0     | 535       | 157     | 379         |
| Bomba Condensador  | 0         | -1    | 10        | 11      | 0           |
| Desaerador         | 0         | 0     | 4288      | 3557    | 731         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -951  | 3557      | 4254    | 254         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 41896     | 38648   | 3248        |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1165      | 1145    | 20          |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 146       | 0       | 146         |
| Total              | 355415    | 55000 | 340808    | 378312  | 262911      |

### Anexo AIII. 4 — Balanço de exergia global do cenário com Reaquecimento

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 355415 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -55000 kW  | 15,5%  |
| E calor             | -37505 kW  | 10,6%  |
| E destruída         | -262911 kW | 74,0%  |
| $\Sigma$            | 0 kW       | 100,0% |

Anexo AIII. 5 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com um (1) Regenerador

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 344826    | 0     | 14756     | 121808  | 237774      |
| Turbina            | 0         | 56161 | 121808    | 55080   | 10567       |
| Condensador        | 0         | 0     | 728       | 213     | 514         |
| Bomba Condensador  | 0         | -2    | 14        | 16      | 1           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5003      | 4272    | 731         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1141 | 4272      | 5108    | 305         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 17605     | 15477   | 2128        |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 38715     | 38648   | 67          |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1169      | 1141    | 28          |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 199       | 0       | 199         |
| Total              | 344826    | 55003 | 205413    | 242918  | 252318      |

Anexo AIII. 6 — Balanço de exergia global do cenário com um (1) Regenerador

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 344826 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -55003 kW  | 16,0%  |
| E calor             | -37505 kW  | 10,9%  |
| E destruída         | -252318 kW | 73,2%  |
| $\Sigma$            | -0,0 kW    | 100,0% |

Anexo AIII. 7 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com dois (2) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 340966    | 0     | 19902     | 126879  | 233989      |
| Turbina            | 0         | 56204 | 126879    | 60073   | 10601       |
| Condensador        | 0         | 0     | 554       | 163     | 392         |
| Bomba Condensador  | 0         | -1    | 11        | 12      | 1           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5144      | 4450    | 694         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1189 | 4450      | 5321    | 318         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 13451     | 12406   | 1046        |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 22313     | 21144   | 1169        |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 38723     | 38648   | 75          |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1166      | 1144    | 22          |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 152       | 0       | 151         |
| Total              | 340966    | 54999 | 233887    | 271392  | 248462      |

Anexo AIII. 8 — Balanço de exergia global do cenário com dois (2) Regeneradores

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 340966 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -54999 kW  | 16,1%  |
| E calor             | -37505 kW  | 11,0%  |
| E destruída         | -248462 kW | 72,9%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |



Anexo AIII. 9 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com três (3) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 338849    | 0     | 22889     | 129670  | 232068      |
| Turbina            | 0         | 56228 | 129670    | 62846   | 10596       |
| Condensador        | 0         | 0     | 460       | 135     | 325         |
| Bomba Condensador  | 0         | -1    | 9         | 10      | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5222      | 4548    | 674         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1215 | 4548      | 5438    | 325         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 11626     | 10995   | 631         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 17979     | 17271   | 708         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 25050     | 24254   | 796         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 38723     | 38648   | 75          |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1164      | 1145    | 18          |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 126       | 0       | 126         |
| Total              | 338849    | 54997 | 258609    | 296114  | 246347      |

Anexo AIII. 10 — Balanço de exergia global do cenário com três (3) Regeneradores

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 338849 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -54997 kW  | 16,2%  |
| E calor             | -37505 kW  | 11,1%  |
| E destruída         | -246347 kW | 72,7%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |

Anexo AIII. 11 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com quatro (4) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 337492    | 0     | 24836     | 131439  | 230888      |
| Turbina            | 0         | 56244 | 131439    | 64616   | 10579       |
| Condensador        | 0         | 0     | 400       | 117     | 282         |
| Bomba Condensador  | 0         | -1    | 8         | 9       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5271      | 4610    | 662         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1232 | 4610      | 5512    | 329         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 10621     | 10193   | 428         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 15551     | 15067   | 484         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 20995     | 20469   | 526         |
| Regenerador 4      | 0         | 0     | 26795     | 26189   | 606         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 38723     | 38648   | 75          |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1162      | 1146    | 16          |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 109       | 0       | 109         |
| Total              | 337492    | 54996 | 281665    | 319170  | 244990      |

Anexo AIII. 12 — Balanço de exergia global do cenário com quatro (4) Regeneradores

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 337492 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -54996 kW  | 16,3%  |
| E calor             | -37505 kW  | 11,1%  |
| E destruída         | -244990 kW | 72,6%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |

Anexo AIII. 13 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com cinco (5) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 336676    | 0     | 26230     | 132733  | 230174      |
| Turbina            | 0         | 56264 | 132733    | 65885   | 10584       |
| Condensador        | 0         | 0     | 363       | 106     | 256         |
| Bomba Condensador  | 0         | -1    | 7         | 8       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5309      | 4655    | 654         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1244 | 4655      | 5566    | 333         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 10029     | 9711    | 318         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 13991     | 13640   | 351         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 18439     | 18051   | 387         |
| Regenerador 4      | 0         | 0     | 23133     | 22708   | 425         |
| Regenerador 5      | 0         | 0     | 28020     | 27528   | 492         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 38723     | 38648   | 75          |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1162      | 1147    | 14          |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 99        | 0       | 99          |
| Total              | 336676    | 55004 | 304036    | 341541  | 244167      |

Anexo AIII. 14 — Balanço de exergia global do cenário com cinco (5) Regeneradores

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 336676 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -55004 kW  | 16,3%  |
| E calor             | -37505 kW  | 11,1%  |
| E destruída         | -244167 kW | 72,5%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |

Anexo AIII. 15 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com seis (6) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 335983    | 0     | 27220     | 133605  | 229598      |
| Turbina            | 0         | 56268 | 133605    | 66765   | 10572       |
| Condensador        | 0         | 0     | 332       | 97      | 235         |
| Bomba Condensador  | 0         | -1    | 7         | 7       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5333      | 4686    | 648         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1252 | 4686      | 5603    | 335         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 9599      | 9353    | 246         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 12928     | 12656   | 272         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 16640     | 16343   | 297         |
| Regenerador 4      | 0         | 0     | 20562     | 20243   | 319         |
| Regenerador 5      | 0         | 0     | 24671     | 24311   | 360         |
| Regenerador 6      | 0         | 0     | 28857     | 28444   | 413         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 38723     | 38648   | 75          |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1161      | 1148    | 13          |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 91        | 0       | 91          |
| Total              | 335983    | 55000 | 325557    | 363062  | 243478      |

Anexo AIII. 16 — Balanço de exergia global do cenário com seis (6) Regeneradores

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 335983 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -55000 kW  | 16,4%  |
| E calor             | -37505 kW  | 11,2%  |
| E destruída         | -243478 kW | 72,5%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |

Anexo AIII. 17 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com sete (7) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 335549    | 0     | 28024     | 134348  | 229226      |
| Turbina            | 0         | 56279 | 134348    | 67492   | 10577       |
| Condensador        | 0         | 0     | 312       | 92      | 221         |
| Bomba Condensador  | 0         | -1    | 6         | 7       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5355      | 4712    | 643         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1259 | 4712      | 5634    | 337         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 9256      | 9063    | 193         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 12171     | 11946   | 225         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 15350     | 15113   | 237         |
| Regenerador 4      | 0         | 0     | 18724     | 18469   | 255         |
| Regenerador 5      | 0         | 0     | 22240     | 21963   | 278         |
| Regenerador 6      | 0         | 0     | 25858     | 25545   | 312         |
| Regenerador 7      | 0         | 0     | 29539     | 29180   | 359         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 38723     | 38648   | 75          |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1160      | 1148    | 13          |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 85        | 0       | 85          |
| Total              | 335549    | 55004 | 347007    | 384512  | 243040      |

Anexo AIII. 18 — Balanço de exergia global do cenário com sete (7) Regeneradores

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 335549 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -55004 kW  | 16,4%  |
| E calor             | -37505 kW  | 11,2%  |
| E destruída         | -243040 kW | 72,4%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |

**Anexo AIII. 19 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com oito (8) Regeneradores**

| Equipamento        | Eq bagaço     | Wvc          | E entrada     | E saída       | E destruída   |
|--------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Caldeira           | 335132        | 0            | 28648         | 134896        | 228884        |
| Turbina            | 0             | 56281        | 134896        | 68047         | 10568         |
| Condensador        | 0             | 0            | 294           | 86            | 208           |
| Bomba Condensador  | 0             | -1           | 6             | 6             | 0             |
| Desareador         | 0             | 0            | 5370          | 4731          | 640           |
| Bomba Alimentação  | 0             | -1264        | 4731          | 5657          | 338           |
| Regenerador 1      | 0             | 0            | 9021          | 8863          | 159           |
| Regenerador 2      | 0             | 0            | 11582         | 11395         | 187           |
| Regenerador 3      | 0             | 0            | 14362         | 14167         | 196           |
| Regenerador 4      | 0             | 0            | 17310         | 17101         | 209           |
| Regenerador 5      | 0             | 0            | 20449         | 20220         | 230           |
| Regenerador 6      | 0             | 0            | 23542         | 23301         | 241           |
| Regenerador 7      | 0             | 0            | 26784         | 26507         | 277           |
| Regenerador 8      | 0             | 0            | 30054         | 29736         | 318           |
| Dessuperaquecedor  | 0             | 0            | 38723         | 38648         | 75            |
| Bomba Processo     | 0             | -15          | 1143          | 1154          | 4             |
| Mix                | 0             | 0            | 1160          | 1148          | 12            |
| Torre Resfriamento | 0             | 0            | 80            | 0             | 80            |
| <b>Total</b>       | <b>335132</b> | <b>55001</b> | <b>368157</b> | <b>405662</b> | <b>242626</b> |

**Anexo AIII. 20 — Balanço de exergia global do cenário com oito (8) Regeneradores**

|                     |            |           |               |
|---------------------|------------|-----------|---------------|
| E quím bagaço+palha | 335132     | kW        | [%]           |
| E potência líquida  | -55001     | kW        | 16,4%         |
| E calor             | -37505     | kW        | 11,2%         |
| E destruída         | -242626    | kW        | 72,4%         |
| <b>Σ</b>            | <b>0,0</b> | <b>kW</b> | <b>100,0%</b> |

Anexo AIII. 21 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com Reaquecimento e um (1) Regenerador

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 341798    | 0     | 115543    | 223281  | 234060      |
| Turbina            | 0         | 56034 | 223281    | 157204  | 10043       |
| Condensador        | 0         | 0     | 198       | 58      | 140         |
| Bomba Condensador  | 0         | -1    | 4         | 4       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 4632      | 3975    | 657         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1062 | 3975      | 4753    | 284         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 16562     | 14367   | 2195        |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 40539     | 38648   | 1891        |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1158      | 1150    | 8           |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 54        | 0       | 54          |
| Agua Retorno       | 0         | 0     | 1143      | 0       | 1143        |
| Total              | 341798    | 54957 | 407088    | 444593  | 249337      |

Anexo AIII. 22 — Balanço de exergia global do cenário com Reaquecimento e um (1) Regenerador

|                        |            |        |
|------------------------|------------|--------|
| E quím<br>bagaço+palha | 341798 kW  | [%]    |
| E potência líquida     | -54957 kW  | 16,1%  |
| E calor                | -37505 kW  | 11,0%  |
| E destruída            | -249337 kW | 72,9%  |
| $\Sigma$               | 0,0 kW     | 100,0% |

Anexo AIII. 23 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com Reaquecimento e dois (2) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 338886    | 0     | 126339    | 234172  | 231053      |
| Turbina            | 0         | 56127 | 234172    | 167827  | 10218       |
| Condensador        | 0         | 0     | 95        | 28      | 67          |
| Bomba Condensador  | 0         | 0     | 2         | 2       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 4793      | 4162    | 631         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1112 | 4162      | 4977    | 297         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 12636     | 11559   | 1077        |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 20981     | 19713   | 1268        |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 40384     | 38648   | 1735        |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1156      | 1152    | 4           |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 26        | 0       | 26          |
| Total              | 338886    | 55000 | 445889    | 483394  | 246381      |

Anexo AIII. 24 — Balanço de exergia global do cenário com Reaquecimento e dois (2) Regeneradores

|                        |            |        |
|------------------------|------------|--------|
| E quím<br>bagaço+palha | 338886 kW  | [%]    |
| E potência líquida     | -55000 kW  | 16,2%  |
| E calor                | -37505 kW  | 11,1%  |
| E destruída            | -246381 kW | 72,7%  |
| $\Sigma$               | 0,0        | 100,0% |



Anexo AIII. 25 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com Reaquecimento e três (3) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 337055    | 0     | 134364    | 241907  | 229512      |
| Turbina            | 0         | 56162 | 241907    | 175440  | 10306       |
| Condensador        | 0         | 0     | 71        | 21      | 50          |
| Bomba Condensador  | 0         | 0     | 1         | 1       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 4909      | 4289    | 620         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1146 | 4289      | 5129    | 306         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 10971     | 10327   | 644         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 16979     | 16224   | 755         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 23687     | 22812   | 875         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 40102     | 38648   | 1454        |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1155      | 1152    | 3           |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 19        | 0       | 19          |
| Total              | 337055    | 55001 | 479599    | 517104  | 244549      |

Anexo AIII. 26 — Balanço de exergia global do cenário com Reaquecimento e três (3) Regeneradores

|                     |         |    |        |
|---------------------|---------|----|--------|
| E quím bagaço+palha | 337055  | kW | [%]    |
| E potência líquida  | -55001  | kW | 16,3%  |
| E calor             | -37505  | kW | 11,1%  |
| E destruída         | -244549 | kW | 72,6%  |
| $\Sigma$            | 0,0     | kW | 100,0% |

Anexo AIII. 27 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com Reaquecimento e quatro (4) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 335813    | 0     | 138032    | 245413  | 228432      |
| Turbina            | 0         | 56180 | 245413    | 178931  | 10303       |
| Condensador        | 0         | 0     | 23        | 7       | 16          |
| Bomba Condensador  | 0         | 0     | 0         | 0       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 4959      | 4350    | 609         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1162 | 4350      | 5202    | 311         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 10009     | 9573    | 436         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 14665     | 14151   | 514         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 19813     | 19238   | 575         |
| Regenerador 4      | 0         | 0     | 25327     | 24649   | 677         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 40069     | 38648   | 1421        |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1154      | 1153    | 1           |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 6         | 0       | 6           |
| Total              | 335813    | 55002 | 504964    | 542469  | 243306      |

Anexo AIII. 28 — Balanço de exergia global do cenário com Reaquecimento e quatro (4) Regeneradores

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 335813 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -55002 kW  | 16,4%  |
| E calor             | -37505 kW  | 11,2%  |
| E destruída         | -243306 kW | 72,5%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |

Anexo AIII. 29 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com Reaquecimento e cinco (5) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 335138    | 0     | 142326    | 249534  | 227930      |
| Turbina            | 0         | 56195 | 249534    | 182976  | 10363       |
| Condensador        | 0         | 0     | 26        | 8       | 18          |
| Bomba Condensador  | 0         | 0     | 1         | 1       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5023      | 4417    | 606         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1180 | 4417      | 5282    | 316         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 9493      | 9171    | 322         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 13250     | 12882   | 368         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 17472     | 17054   | 418         |
| Regenerador 4      | 0         | 0     | 21939     | 21471   | 469         |
| Regenerador 5      | 0         | 0     | 26613     | 26064   | 549         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 39909     | 38648   | 1261        |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1154      | 1153    | 1           |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 7         | 0       | 7           |
| Total              | 335138    | 55000 | 532309    | 569814  | 242633      |

Anexo AIII. 30 — Balanço de exergia global do cenário com Reaquecimento e cinco (5) Regeneradores

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 335138 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -55000 kW  | 16,4%  |
| E calor             | -37505 kW  | 11,2%  |
| E destruída         | -242633 kW | 72,4%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |

Anexo AIII. 31 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com Reaquecimento e seis (6) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 334539    | 0     | 144395    | 251493  | 227440      |
| Turbina            | 0         | 56206 | 251493    | 184922  | 10365       |
| Condensador        | 0         | 0     | 6         | 2       | 4           |
| Bomba Condensador  | 0         | 0     | 0         | 0       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5052      | 4451    | 601         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1189 | 4451      | 5322    | 318         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 9088      | 8840    | 249         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 12246     | 11961   | 284         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 15769     | 15450   | 319         |
| Regenerador 4      | 0         | 0     | 19496     | 19147   | 350         |
| Regenerador 5      | 0         | 0     | 23416     | 23014   | 401         |
| Regenerador 6      | 0         | 0     | 27428     | 26964   | 464         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 39878     | 38648   | 1230        |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1154      | 1154    | 0           |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 2         | 0       | 2           |
| Total              | 334539    | 55002 | 555015    | 592520  | 242032      |

Anexo AIII. 32 — Balanço de exergia global do cenário com Reaquecimento e seis (6) Regeneradores

|                     |            |        |
|---------------------|------------|--------|
| E quím bagaço+palha | 334539 kW  | [%]    |
| E potência líquida  | -55002 kW  | 16,4%  |
| E calor             | -37505 kW  | 11,2%  |
| E destruída         | -242032 kW | 72,3%  |
| $\Sigma$            | 0,0 kW     | 100,0% |

Anexo AIII. 33 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com Reaquecimento e sete (7) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 334246    | 0     | 146966    | 253976  | 227235      |
| Turbina            | 0         | 56225 | 253976    | 187346  | 10405       |
| Condensador        | 0         | 0     | 11        | 3       | 8           |
| Bomba Condensador  | 0         | 0     | 0         | 0       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5092      | 4491    | 600         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1200 | 4491      | 5370    | 321         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 8791      | 8597    | 195         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 11565     | 11332   | 234         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 14590     | 14337   | 253         |
| Regenerador 4      | 0         | 0     | 17804     | 17527   | 277         |
| Regenerador 5      | 0         | 0     | 21161     | 20855   | 306         |
| Regenerador 6      | 0         | 0     | 24626     | 24278   | 348         |
| Regenerador 7      | 0         | 0     | 28168     | 27766   | 402         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 39788     | 38648   | 1139        |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1154      | 1154    | 0           |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 3         | 0       | 3           |
| Total              | 334246    | 55010 | 579330    | 616835  | 241730      |

Anexo AIII. 34 — Balanço de exergia global do cenário com Reaquecimento e sete (7) Regeneradores

|                     |         |    |        |
|---------------------|---------|----|--------|
| E quím bagaço+palha | 334246  | kW | [%]    |
| E potência líquida  | -55010  | kW | 16,5%  |
| E calor             | -37505  | kW | 11,2%  |
| E destruída         | -241730 | kW | 72,3%  |
| $\Sigma$            | 0,0     | kW | 100,0% |

Anexo AIII. 35 — Balanço de exergia para cada equipamento do cenário com Reaquecimento e oito (8) Regeneradores

| Equipamento        | Eq bagaço | Wvc   | E entrada | E saída | E destruída |
|--------------------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| Caldeira           | 334079    | 0     | 148884    | 255850  | 227112      |
| Turbina            | 0         | 56268 | 255850    | 189156  | 10427       |
| Condensador        | 0         | 0     | 13        | 4       | 9           |
| Bomba Condensador  | 0         | 0     | 0         | 0       | 0           |
| Desareador         | 0         | 0     | 5122      | 4522    | 600         |
| Bomba Alimentação  | 0         | -1208 | 4522      | 5407    | 323         |
| Regenerador 1      | 0         | 0     | 8590      | 8430    | 160         |
| Regenerador 2      | 0         | 0     | 11033     | 10840   | 194         |
| Regenerador 3      | 0         | 0     | 13685     | 13477   | 207         |
| Regenerador 4      | 0         | 0     | 16498     | 16273   | 225         |
| Regenerador 5      | 0         | 0     | 19499     | 19248   | 251         |
| Regenerador 6      | 0         | 0     | 22462     | 22195   | 267         |
| Regenerador 7      | 0         | 0     | 25578     | 25269   | 309         |
| Regenerador 8      | 0         | 0     | 28735     | 28380   | 355         |
| Dessuperaquecedor  | 0         | 0     | 39729     | 38648   | 1080        |
| Bomba Processo     | 0         | -15   | 1143      | 1154    | 4           |
| Mix                | 0         | 0     | 1154      | 1153    | 1           |
| Torre Resfriamento | 0         | 0     | 4         | 0       | 4           |
| Total              | 334079    | 55045 | 602503    | 640008  | 241529      |

Anexo AIII. 36 — Balanço de exergia global do cenário com Reaquecimento e oito (8) Regeneradores

|                     |         |    |        |
|---------------------|---------|----|--------|
| E quím bagaço+palha | 334079  | kW | [%]    |
| E potência líquida  | -55045  | kW | 16,5%  |
| E calor             | -37505  | kW | 11,2%  |
| E destruída         | -241529 | kW | 72,3%  |
| $\Sigma$            | 0,0     | kW | 100,0% |