

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

TESE DE DOUTORADO

**Estudo Técnico, Econômico e Ambiental da
Utilização de Alternativas Tecnológicas para a
Geração de Eletricidade na Cadeia Produtiva
do Carvão Vegetal no Brasil**

Autor: MSc. Márcio Montagnana Vicente Leme

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini

Co-Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

Itajubá, 01 de Novembro de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TESE DE DOUTORADO

**Estudo Técnico, Econômico e Ambiental da
Utilização de Alternativas Tecnológicas para a
Geração de Eletricidade na Cadeia Produtiva
do Carvão Vegetal no Brasil**

Autor: MSc. Márcio Montagnana Vicente Leme

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini

Co-Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

Curso: Doutorado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Conversão de Energia

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Itajubá, 01 de Novembro de 2016

M.G. – Brasil

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

TESE DE DOUTORADO

**Estudo Técnico, Econômico e Ambiental da
Utilização de Alternativas Tecnológicas para a
Geração de Eletricidade na Cadeia Produtiva
do Carvão Vegetal no Brasil**

Autor: MSc. Marcio Montagnana Vicente Leme

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini

Co-orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cláudio Homero Ferreira da Silva – CEMIG

Prof. Dr. Edgardo Olivares Gomez – CTBE

Prof. Dr. Vladimir Rafael Melián Cobas – UNIFEI

Prof. Dr. Mateus Henrique Rocha – UNIFEI

Dedicatória

À Maria Clara e ao João

Agradecimentos

À minha esposa Maria Clara e ao meu filho ao João, pela paciência, apoio e carinho, principalmente nos vários dias em que estive ausente.

Agradeço ao meus pais Sonia e Afonso Leme e ao meus irmãos Paulo Henrique e Alexandre, esta conquista também é de vocês.

À Universidade Federal de Itajubá e aos meus orientadores, Osvaldo e Electo, pelo estímulo, paciência, amizade, conhecimento e espírito de colaboração que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho

À Plantar Siderúrgica S.A. por subsidiar a execução deste trabalho, e aos amigos Augusto, Celso, Daniel, Mateus, Nestor, Raney, Wellington, e toda equipe de Desenvolvimento e Projetos, pelo exemplo de trabalho, dedicação e competência, além de todo auxílio no desenvolvimento desta tese.

Aos meus colegas do Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica (NEST), pelo constante apoio, colaboração e amizade.

À todos os amigos da Rep n' Roll, sem vocês não teria conseguido.

À CAPES, através do Programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

*“A neve e as tempestades matam as flores,
mas nada podem contra as sementes..”*

Khalil Gibran

Resumo

LEME, M. M. V. (2016), Estudo Técnico, Econômico e Ambiental da Utilização de Alternativas Tecnológicas para a Geração de Eletricidade na Cadeia Produtiva do Carvão Vegetal no Brasil, 230p. Tese de Doutorado (Doutorado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

O Brasil é único país que produz carvão vegetal em larga escala. Seu processo produtivo tem como um de seus subprodutos gases, que são emitidos diretamente para a atmosfera, causando degradação ambiental e gerando um enorme desperdício de energia. Estes gases correspondem de 35 a 50% do conteúdo energético da madeira, gerando uma perda estimada de 4 Mtep anualmente no país. Este trabalho avaliou a possibilidade de recuperação desta energia para produção de eletricidade, tendo como base de estudo a unidade de carbonização da Plantar Siderúrgica S.A., localizada em Itacambira (MG), para a qual se determinou um PCI médio de 1268 kJ/kg para a fração não condensável dos vapores e uma potência disponível de 57,125 MW_t, considerando o funcionamento sincronizado de vários fornos retangulares de carbonização. Foram analisadas três tecnologias de conversão energética: o ciclo Rankine a vapor, o ciclo Rankine orgânico, e as turbinas a gás de queima externa, os quais apresentaram eficiências 24%, 23,7% e 19,3%, respectivamente. Uma análise econômica indicou o ORC como a tecnologia mais viável para o caso, onde estima-se um potencial de geração de 0,95 MWh de energia elétrica por tonelada de carvão produzida. Uma Análise do ciclo de vida comparativa foi conduzida para avaliar ambientalmente o sistema, sendo a recuperação de eletricidade capaz de melhorar todos os impactos avaliados. Foi encontrado uma relação entre o *input/output* de energia anual de 5,9 unidades e capaz de capturar 3,4 tCO₂ eq. por tonelada de carvão produzida, o que pode ser melhorado pela adoção da recuperação de energia em até 12% e 51%, respectivamente. A oxidação fotoquímica resultou no impacto mais significativo, mostrando a importância da queima do gás para a qualidade ambiental local. A normalização dos resultados mostrou que o sistema proposto abateu 116% dos impactos ambientais avaliados, tornando o sistema de produção positivo ao meio ambiente.

Palavras-chave: Biomassa, Carvão Vegetal, Recuperação de energia, Pirólise Lenta, ACV, ORC, EFGT.

Abstract

LEME, M. M. V. (2016), Technical, Economic and Environmental Study of the Technological Alternatives for Electricity Generation in the Charcoal Chain Production in Brazil, 230p. PhD Thesis (PhD in Energy Conversion) - Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.

Brazil is the only country that produces charcoal on an large scale. Its manufacturing has as one of its by-products pyrolysis gases, which are emitted directly into the atmosphere, causing environmental degradation and a huge energy waste. These gases corresponds to 35 to 50% of the initial wood energy content, losing 4 million toe of energy annually. This study evaluated the possibility to recover this energy for electricity production, based on a case study: the carbonization unit of Plantar Siderúrgica S.A. located in Itacambira (Minas Gerais state), where it was determined a non-condensable gases LHV of 1268 kJ/kg, and an energy potential of 57.125 MWt, considering the synchronous operation of multiple carbonization furnaces in cluster systems. Three energy conversion technologies were evaluated: the steam cycle; the externally fired gas turbines and an organic Rankine cycle. Showing efficiencies of 24%, 19,3% and 23,7%, respectively. An economic analysis indicated the ORC as the most viable technology for the case with an estimated potential to generate 0.95 MWh_e per ton of charcoal produced. A life-cycle analysis was conducted to assess the system by an environmental point of view. The energy recovery was capable to improve all evaluated impacts. It was found an annual output/input energy ratio of 5,9 units, and the system was able to offset 3,4 tCO₂ eq. per ton of charcoal produced, which can be improved by 12% and 51%, respectively, by adopting a power generation system. The photochemical oxidation resulted in the most significant impact, showing the importance of burning the gas to the local environmental quality. The normalization of the results showed that this system can diminish 116% of the assessed environmental impacts, making the system positive form an environmental point of view.

Keywords: Biomass, Charcoal, Energy recovery, Slow Pyrolysis, LCA, ORC, EFGT.

Sumário

SUMÁRIO	9
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	18
CAPÍTULO 1. PROPOSTA DA TESE	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Motivação e Alcance da Tese	4
1.3. Hipóteses da Tese	6
1.4. Objetivos	7
1.5. Metodologia	8
1.6. Apresentação da Tese	8
1.7. Adequação da Tese as Linhas de Pesquisas da Pós-Graduação	9
CAPÍTULO 2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	10
2.1. Produção de Carvão Vegetal	10
2.1.1. Produtos da Carbonização da Madeira	23
2.1.2. Recuperação e Uso da Fração Líquida da Carbonização.	25
2.1.3. Rendimento dos Produtos da Carbonização.	26
2.2.4. Variação Temporal da Composição dos Gases de Carbonização.	28
2.2. A Indústria de Carbonização no Brasil.	30
2.3. Produção de Carvão Vegetal em Fornos Retangulares	35
2.4. Análise do Ciclo de Vida (ACV)	39
2.4.1. Definição do Objetivo e do Escopo	41
2.4.2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	41
2.4.3. Avaliação do impacto do Ciclo de Vida (AICV)	42
2.4.4. Interpretação dos resultados e avaliação de melhorias	45
2.5. Tecnologias de conversão energética	46
2.5.1. EFGT	46
2.5.2. Ciclo Rankine a Vapor	57

2.5.3. ORC -----	61
CAPÍTULO 3. COMBUSTÃO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO _____	66
3.1. Princípios da Combustão de Gases -----	66
3.1.1. Inflamabilidade de Gases -----	72
3.2. Queimadores de gases da carbonização -----	77
3.3. Queimador da UC Itacambira -----	83
3.3.1. Resultados e Discussão sobre os Testes no Queimador da UC Itacambira -----	85
3.4. Inflamabilidade dos Gases de Carbonização -----	97
CAPÍTULO 4. POTENCIAL ENERGÉTICO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO GERADOS EM FORNOS RETANGULARES _____	105
4.1. Balanço de Massa e energia. -----	107
4.1.1. Balanço de Massa -----	108
4.1.2. Balanço de Energia -----	117
4.2. Funcionamento do Sistema em <i>Cluster</i> e Determinação do Potencial Energético ---	135
4.3. Avaliação das Tecnologias de Conversão Energética -----	142
4.3.1. Ciclo Rankine a Vapor -----	143
4.3.2. EFGT. -----	147
4.3.3. ORC. -----	154
4.3.4. Comparação Entre as Tecnologias e Análise Econômica -----	164
CAPÍTULO 5. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL E UTILIZAÇÃO DOS GASES NA UC _____	171
5.1. Metodologia de ACV no trabalho -----	171
5.1.1 Definição do Objetivo e do Escopo -----	171
5.1.2. Função e unidade funcional. -----	172
5.1.3. Limites do Sistema. -----	172
5.1.4. Fronteiras Geográfica, Temporal e Tecnológica. -----	174
5.1.5. Metodologia de Avaliação dos Impactos ambientais. -----	177
5.1.6. Requisito de Dados. -----	179
5.1.7. Limitações -----	180
5.2. Inventário do Ciclo de Vida -----	182

5.2.1. Subsistema Produção Florestal -----	182
5.2.1. Subsistema Unidade de Carbonização -----	183
5.3. Avaliação do Impacto do ciclo de Vida-----	187
5.3.1. Depleção de Recursos Abióticos-----	187
5.3.2. Aquecimento Global -----	190
5.3.3. Depleção da Camada de Ozônio -----	192
5.3.4. Oxidação Fotoquímica-----	193
5.3.5. Toxicidade Humana. -----	194
5.3.6. Acidificação. -----	196
5.3.7. Eutrofização. -----	196
5.3.8. Conclusões do capítulo -----	197
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES -----	200
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	203
APÊNDICE I-----	222
APÊNDICE II-----	223
APÊNDICE III-----	224
APÊNDICE IV-----	226
APÊNDICE V-----	230

Lista de Figuras

Figura 2.1. Desenhos feitos com carvão na Caverna Chauvet (The Guardian, 2015).	10
Figura 2.2. Pirólise de uma partícula de Biomassa (Basu, 2010).	12
Figura 2.3. Efeitos da temperatura final e da taxa de aquecimento nos rendimentos de carvão. As linhas sólidas e tracejadas representam taxas de aquecimento de 2 e 10 °C/min, respectivamente (Schenkel, 1999).	14
Figura 2.4. Efeito da temperatura de pirólise no produto sólido da carbonização (Brito,2010).	15
Figura 2.5. Efeito da temperatura nos produtos da pirólise da celulose com o equilíbrio termoquímico a diferentes temperaturas. (Reynolds, 1987).	17
Figura 2.6. Esquema de conversão da madeira para carvão vegetal (Brito, 1990).	19
Figura 2.7. Comparação dos custos de produção das tecnologias de carbonização brasileiras (Almado, 2014).	21
Figura 2.8. Rendimento dos produtos da pirólise em função das condições do processo (Overend, 2004).	27
Figura 2.9. Variação mássica dos produtos da carbonização durante as fases da pirólise (Biocarbo, 2007).	30
Figura 2.10. Produção de carvão vegetal no Brasil de 1970 a 2015 (BEN, 2015; BEN, 2016)	33
Figura 2.11. Consumo nacional de Carvão vegetal de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013).	33
Figura 2.12. Exemplo de um Forno Retangular com carregamento mecânico (Almado, 2014; Santos, 2007).	36
Figura 2.13. Evolução da capacidade produtiva dos Fornos Retangulares (Almado, 2014)	37
Figura 2.14. RAC 40, 110, 220 e 700. (Carrier, 2014).	37
Figura 2.15. Forno retangular utilizado para produção de carvão vegetal da Plantar Energética em Itacambira (MG).	38
Figura 2.16. Fases da ACV (ISO, 2006a).	40
Figura 2.17. Exemplo representativo da metodologia de AICV (Adaptado de Silva, 2006c).	43

Figura 2.18. Esquema de uma central baseada em turbina a gás de queima direita com ciclo aberto.	47
Figura 2.19. Esquema de uma central baseada em turbina a gás de queima direita com ciclo fechado.	48
Figura 2.20. Ciclo da turbina a gás de queima direita	49
Figura 2.21. Esquema de uma central baseada em EFGT com ciclo recuperativo (Zheshu e Turan, 2010)	51
Figura 2.22. Ciclo de EFGT (Kautz e Hansen 2007)	51
Figura 2.23. Esquema do sistema EFGT a biomassa, Escola de engenharia mecânica, University of Science, Malaysia (Al-Attab e Zainal, 2009).	53
Figura 2.24. Esquema de uma instalação EFGT com gaseificação pressurizada (Datta et al., 2009).	53
Figura 2.25. Trocador de calor de casco e tubo de aço inox (Al-Attab e Zainal, 2009).	54
Figura 2.26. Eficiência elétrica pela relação de pressão e com a temperatura de saída dos gases do combustor (COT) (Carrara, 2010).	55
Figura 2.27. Sistema de condução de gases no projeto EFGT - Arcelor/Cemig.	56
Figura 2.28. EFGT instalada na UPE Buriti no projeto Arcelor/Cemig.	56
Figura 2.29. Trocador de calor da EFGT instalado na UPE Buriti no projeto Arcelor/Cemig.	57
Figura 2.30. Esquema simplificado de uma instalação de potência a vapor	58
Figura 2.31. Ciclo Rankine básico.	59
Figura 2.32. Esquema de uma central ORC e diagrama T-S do ciclo (Lai et al., 2011).	62
Figura 2.33. Exemplo de diferentes fluidos utilizados na tecnologia ORC.	64
Erro! Fonte de referência não encontrada. Figura 3.1. Energia de ativação para diferentes gases (Glassman e Yetter, 2008).	74
Figura 3.2. Influência da temperatura nos limites de inflamabilidade do metano (Mullinger e Jenkins, 2008).	74
Figura 3.3. Limites de inflamabilidade de varias misturas inerte-metano-ar a 1 atm e 298 K (Glassman e Yetter, 2008).	76 78
Figura 3.4. Queimador de Gases da Carbonização da Viena Siderúrgica (Duarte e Mota, 2010)	79 81
Figura 3.5. Queimador Circular da Arcelor Mittal ligado a dois fornos retangulares (Arcelor Mittal, 2012).	81

Figura 3.6. Vista Geral da UC Lagoinha da Aperam Bioenergia	81
Figura 3.7. Queimador de gases retangular da Aperam Bioenergia.	82
Figura 3.8. Queimador de gases do projeto EFGT - Arcelor/Cemig	82
Figura 3.9. Queimador de gases do projeto EFGT - Arcelor/Cemig, vistas parciais.	
Figura 3.10. Layout dos fornos e queimador central na UC Itacambira (FRP=Forno Retangular Plantar).	84
	85
Figura 3.12. Detalhes construtivos do queimador de gases da UC Itacambira.	86
Figura 3.13. Localização dos termopares no queimador da Plantar.	87
Figura 3.14. Perfil térmico do teste 09 realizado no queimador da UC Itacambira	
Figura 3.15. Concentração de oxigênio na entrada do queimador com diferentes fornos conectados.	89
Figura 3.16. Concentração de oxigênio na entrada do queimador com fornos conectados em conjunto. *média das medidas individuais dos fornos	89
Figura 3.17. Concentração CH ₄ na entrada do queimador em relação ao número de fornos conectados.	90
Figura 3.18. Concentração de O ₂ e CH ₄ na entrada do queimador em relação ao número de fornos no teste 19.	90
Figura 3.19. Concentração de O ₂ e CH ₄ na entrada do queimador em relação ao número de fornos no teste 20.	91
	91
Figura 3.20. Resultados comparativos da queima de gases no teste 20.	
Figura 3.21. Concentração de metano, dióxido de carbono e oxigênio na saída do queimador durante o teste 20.	92
	92
Figura 3.22. Gráfico de temperatura do teste 20.	
Figura 3.23. Resultados comparativos da queima de gases no teste 21 com cinco fornos.	93
	95
Figura 3.24. Gráfico de temperatura do teste no queimador novo.	
Figura 3.25. Diagrama ternário de inflamabilidade do metano com o oxigênio e o nitrogênio em condição ambiente (TINGGUANG, 2015).	98
Figura 3.26. Resultados dos cálculos do índice limite de ignição (T _{ci}) para os gases de carbonização em fornos retangulares, com a metodologia ISO 10156.	100
Figura 3.27. Resultados dos cálculos de inflamabilidade para os gases de carbonização em fornos retangulares, com a metodologia da temperatura de chama adiabática (T _i = 67°C).	102

Figura 3.28. Resultados dos cálculos de inflamabilidade para os gases de carbonização em fornos retangulares, com a metodologia da temperatura de chama adiabática ($T_i = 250^{\circ}\text{C}$).	103
Figura 3.29. Resultados dos cálculos de inflamabilidade para os gases de carbonização em fornos retangulares, com a metodologia da temperatura de chama adiabática ($T_i = 450^{\circ}\text{C}$).	108
Figura 4.1. Fronteiras do Sistema utilizadas no Balanço de massa e energia.	110
Figura 4.2. Resultados do balanço de massa para um forno retangular	112
Figura 4.3. Emissão de N_2 e O_2 durante a carbonização nas corridas 1,3,4 e 5.	112
Figura 4.4. Emissão de H_2 durante a carbonização nas corridas 1,3,4 e 5.	113
Figura 4.5. Emissão de CO_2 durante a carbonização nas corridas 1,3,4 e 5.	113
Figura 4.6. Emissão de CO durante a carbonização nas corridas 1,3,4 e 5.	114
Figura 4.7. Emissão de CH_4 durante a carbonização nas corridas 1, 3, 4 e 5.	
Figura 4.8. Emissão de gases condensáveis durante a carbonização nas corridas 1, 3, 4 e 5.	114
Figura 4.9. Relação entre o oxigênio fornecido e o oxigênio requerido para a combustão dos GNC durante o ciclo de carbonização (Corrida 3).	116
Figura 4.10. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos GC, base no PCS e base no PCI (B).	124
Figura 4.11. Relação percentual entre os componentes energéticos dos GNC, com base no PCS.	127
Figura 4.12. Relação percentual entre os componentes energéticos dos GNC, com base no PCI.	131
Figura 4.13. Fluxo de calor perdido para o ambiente durante a carbonização [kWt].	
Figura 4.14. Resultados do Balanço de energia para um forno retangular, cálculos com base no PCS dos componentes.	132
Figura 4.15. Resultados do Balanço de energia para um forno retangular, cálculos com base no PCI dos componentes.	134
Figura 4.16. Variação horária da energia dos gases emitidos durante a carbonização.	
Figura 4.17. Variação temporal da energia dos GNC e dos GC durante a carbonização, para a média horária.	135
Figura 4.18. Esquema de funcionamento do cluster de fornos.	138
Figura 4.19. Variação da potência térmica disponível no cluster de fornos.	139

Figura 4.20. Resíduos florestais na UC Itacambira da Plantar siderúrgica.	143
Figura 4.21. Esquema simplificado do condensador a ar de ação direta (Heyns, 2008)	
Figura 4.22. Pressão de condensação para diferentes tipos de sistemas de resfriamento em turbinas a vapor (Ballegooyen e Durkin, 2000)	144 146
Figura 4.23. Modelagem do ciclo Rankine a vapor	149
Figura 4.24. Modelagem do ciclo EFGT sem regeneração	149
Figura 4.25. Modelagem do ciclo EFGT com regeneração	
Figura 4.26. Variação da eficiência do ciclo EFGT em função da RP do compressor para diferentes temperaturas de entrada na turbina, no ciclo sem regeneração (a) e com regeneração(b).	151
Figura 4.27. Relação entre razão de pressão, eficiência (η) e efetividade (ϵ) do trocador de calor de alta temperatura para o ciclo EFGT sem regeneração a 715 °C.	152 155
Figura 4.28. Uso dos gases de carbonização no ciclo ORC	
Figura 4.29. Variação da eficiência do ciclo ORC em relação à pressão de trabalho e o nível de superaquecimento para o Tolueno.	160 172
Figura 5.1. Limites do Sistema da ACV.	176
Figura 5.2. Maquinários utilizados na operação de corte da madeira	
Figura 5.3. Resultados da AICV para depleção de recursos abióticos, em kg Sb eq./tcarvão.	187
Figura 5.4. Resultados da AICV para depleção de recursos abióticos, combustíveis Fósseis, em MJ/tcarvão.	188
Figura 5.5. Produção de eucalipto, porcentagem contribuição por subsistema na categoria Depleção de Recursos Abióticos, combustíveis fósseis (Total: 324 MJ/5,31 m³madeira)	189
Figura 5.6. Produção de carvão vegetal (Cenário 1), porcentagem de contribuição por subsistema na categoria Aquecimento Global (Total do Cenário 1: 3227 kg CO2 eq/tcarvão).	190
Figura 5.7. Emissões de GEE no processo produtivo do carvão vegetal, porcentagem de cada substância em relação ao total emitido no ciclo de vida do carvão: 3280 kg CO2 eq./tcarvão.	191 192
Figura 5.8. Resultados da AICV para o Aquecimento Global, em kg CO2 eq	
Figura 5.9. Subsistema florestal, porcentagem de contribuição por subsistema na categoria Depleção da Camada de Ozônio (Total: 1,43E-08 kg CFC-11	193

eq./m³madeira).

Figura 5.10. Resultados da AICV para a Depleção da Camada de Ozônio, kg CFC11eq./tcarvão. 193

Figura 5.11. Resultados da AICV para a categoria Oxidação Fotoquímica, resultado em kg de C₂H₄ eq./tcarvão. 194

Figura 5.12. Subsistem produção florestal, porcentagem de contribuição por subsistema na categoria Toxicidade Humana (Total: 0,86 kg 1,4-DB eq./m³madeira) 195

Figura 5.13. Resultados da AICV para a categoria Toxicidade Humana, em kg 1,4-DB eq. 196 195

Figura 5.14. Resultados da AICV para a categoria Acidificação, em kg SO₂ eq.

Figura 5.15. Resultados da AICV para a categoria Toxicidade Humana, em kg PO₄-3 eq. 197 198

Figura 5.16. Resultados relativos da AICV para todas as categorias de impacto.

Figura 5.17. Normalização por categoria de impacto dos resultados da caracterização. 198

Figura 5.18. Soma dos resultados normalizados da AICV para os cenários avaliados. 199

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Produtos característicos da pirólise da Biomassa (base seca) (Lohria et al., 2016).	16
Tabela 2.2. Comparativo das tecnologias de pirólise (Mohan et al., 2006)	16
Tabela 2.3. Fases do processo de carbonização (Doat, e Petrof, 1975).	19
Tabela 2.4. Principais tecnologias utilizadas na produção de carvão vegetal no Brasil (Arruda, 2011; Santos, 2007; Oliveira, 2012).	22
Tabela 2.5. Aplicações comerciais dos produtos da destilação seca da madeira (Brito e Barrichelo, 1981).	24
Tabela 2.6. Produtos da carbonização (Santos, 2007).	27
Tabela 2.7. Composição química média dos produtos gasosos da destilação seca da madeira (Brito e Barrichelo, 1981).	28
Tabela 2.8. Rendimentos para diferentes espécies (Brito e Barrichelo, 1981).	28
Tabela 2.9. Valores médios dos rendimentos dos produtos da carbonização, às temperaturas máximas de 400 °C e de 600 °C (Santiago e Andrade, 2005).	28
Tabela 2.10. Evolução temporal da carbonização (Brito e Barrichello, 1981).	29
Tabela 2.11. Produção de carvão vegetal no Mundo em 2010 (Kuparinen et al., 2014).	31
Tabela 2.12. Características de diferentes fluidos utilizados na tecnologia ORC.	64
Tabela 3.1. Tipos de misturas combustíveis. λ = excesso de ar	67
Tabela 3.2. Valores usuais dos coeficientes de excesso de ar (Pinheiro, 1996).	68
Tabela 3.3. Limites de Inflamabilidade de alguns combustíveis, tendo o ar como oxidante (Glassman e Yetter, 2008).	73
Tabela 3.4. Desempenho de um queimador de gases da carbonização (Barcellos et al., 2004).	80
Tabela 3.5. Situação dos fornos no teste 18.	88
Tabela 3.6. Análises feitas no teste 18 na entrada do queimador.	88
Tabela 4.1. Sistemática de avaliação aplicada na coleta de dados (com base em 6 fornadas).	106
Tabela 4.2. Produção média de gases de carbonização em um forno retangular da UC Itacambira.	107

Tabela 4.3. Resultados do balanço de massa nos fornos retangulares.	110
Tabela 4.4. Análise elementar da madeira de eucalipto (Carneiro et al., 2012a).	110
Tabela 4.5. Reação de combustão estequiométrica para 1000 kg de madeira de eucalipto.	111
Tabela 4.6. Soma dos componentes gasosos gerados durante o ciclo de carbonização (Corrida) em valores absolutos e porcentagem.	115
Tabela 4.7. Cálculo do coeficiente de excesso de ar médio para as corridas.	115
Tabela 4.8. Poder calorífico da madeira e dos produtos da carbonização (Ferreira, 2009; Biomassa, 2013; Oliveira, 2012; Carneiro et al., 2012a).	119
Tabela 4.9. Cálculo do conteúdo de energia do ácido pirolenhoso na corrida média (s/ água).	122
Tabela 4.10. Conteúdo energético do ácido pirolenhoso (sem água).	122
Tabela 4.11. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos GC em valores absolutos.	123
Tabela 4.12. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos Gases Condensáveis (GC) em porcentagem com base no PCS e PCI dos componentes.	124
Tabela 4.13. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos GNC em valores absolutos para a corrida média.	126
Tabela 4.14. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos (GNC) a 250 °C em porcentagem, com base no PCS e PCI.	127
Tabela 4.15. Características físicas do forno utilizadas na análise de perda de calor pelas paredes do forno.	130
Tabela 4.16. Resultados do balanço energético, cálculos baseados no PCS.	132
Tabela 4.17. Resultados do balanço energético, cálculos baseados no PCI.	132
Tabela 4.18. Dados de entrada para o cálculo do potencial energético	137
Tabela. 4.19. Resultados do potencial energético do cluster de fornos.	137
Tabela. 4.20. Resultado da análise de Inflamabilidade do cluster na hora de menor potência.	140
Tabela 4.21. Cronograma de operação diária do cluster.	141
Tabela 4.22. Vazão de GNC utilizada na modelagem dos ciclos termodinâmicos	142
Tabela 4.23. Equação global de combustão dos GNC.	142
Tabela 4.24. Resultados da modelagem do ciclo Rankine a vapor.	147
Tabela 4.25. Resultados da modelagem da EFGT	153

Tabela 4.26. Parâmetros termodinâmicos dos fluidos orgânicos selecionados	159
Tabela 4.27. Resultados da modelagem do ciclo ORC.	163
Tabela 4.28. Resultados da modelagem dos ciclos termodinâmicos.	164
Tabela 4.29. Balanço da geração de eletricidade anual do Empreendimento.	165
Tabela 4.30. Custos utilizados na análise econômica	166
Tabela 4.31. Resultados da Avaliação Econômica.	168
Tabela 5.1. Fontes de dados secundárias para a elaboração do ICV	180
Tabela 5.2. Emissões de gás carbônico e água durante a queima dos gases de carbonização	184
Tabela 5.3. Emissões de gases resultantes da queima dos gases da carbonização.	
Tabela 5.4. Quantidade de energia consumida durante o ciclo de vida do carvão vegetal (para 1 t de produto).	186
Tabela 5.5. Resultado da relação <i>input</i> de energia renovável e fóssil e o <i>output</i> de energia para os produtos gerados no ciclo de vida do carvão (valores para 1 t de produto produzida em um ciclo de vida de 14 anos).	187
Tabela 5.6. Porcentagem de contribuição no subsistema UC para as principais substâncias emitidas na categoria de impacto aquecimento global.	191
Tabela 5.7. Porcentagem de contribuição no subsistema florestal (produção de eucalipto) para as principais substâncias emitidas na categoria de impacto aquecimento global.	191

Simbologia

Símbolos

a_i	Concentração do combustível i na mistura
B	Fração molar do componente inerte
Ca	Capacidade
C_f	Conteúdo de carbono fixo
C_p	Calor específico
C_u	Custo
E	Energia
F	Fração do componente inflamável
H	Entalpia
h	Entalpia específica
$h_{l,Sat}$	Entalpia no ponto de saturação
H_{lv}	Calor latente de vaporização
h_{lv}	Calor latente de vaporização específico
H_R	Entalpia de reação
h_R	Entalpia de reação específica
h_f^o	Entalpia de formação
IF	Número de componentes inflamáveis
IN	Número de componentes inertes
K	Condutividade térmica
KN	Coeficiente de equivalência com o nitrogênio
L	Limite de inflamabilidade
m	fluxo de massa
MV	Material volátil

P	Pressão
Q	Calor
R	Resistência térmica
Re	Rendimento
RP	Razão de Pressão
S	Entropia
T	Temperatura
Tci	Índice limite de ignição
U	Condutância
Umd	Umidade
V	Volume
W	Trabalho
ΔT	Gradiente de temperatura
Δt	Intervalo de Tempo
Δx	Espessura do material
η_{Cf}	Rendimento de carbono fixo

Letras Gregas

ε	Efetividade
η	Eficiência
θ	Ângulo de inclinação da curva de vapor saturado
λ	excesso de ar
σ	Concentração de CO2 mais N2

Subscritos

0	Referência
b	Bomba
cb	Combustão
comb	Combustível
comp	Compressor
c	Crítica
e	Entrada
evap	Evaporador
f	Formação
fon	Fonte de calor
GC	Gases condensáveis
GNC	Gases Não condensáveis
is	Isentrópico
méd	Médio
p	Produtos
Pcte	Pressão constante
Piro	Pirolenhoso
r	Reagentes
reg	Regenerador
s	Saída
sens	Sensível
T	Temperatura
t	Turbina
vap	Vaporização
Cf	Conteúdo de carbono fixo
VC	Volume de Controle
est	Estequiométrico

Abreviaturas

ABCV	Associação Brasileira do Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AF	Razão Ar Combustível (Air-Fuel Ratio)
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
MAS	Associação Mineira de Silvicultura
b.s.	Base seca
b.u.	Base úmida
BEN	Balanco Energético Nacional
BTU	<i>British Thermal Unit</i>
CEPCI	<i>Chemical Engineering Plant Cost Index</i>
CML	<i>Chain Management by Life Cycle Assessment</i>
COC	Compostos Orgânicos Condensáveis
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos
CSSL	Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido
DTI	Diferença de Temperatura Inicial
EFGT	Turbinas a gás de Queima Externa (<i>Externally Fired Gas Turbines</i>)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FRP	Forno Retangular Plantar

GC	Gases Condensáveis
GEE	Gases do Efeito Estufa
GNC	Gases Não Condensáveis
GT	Gases Totais (GNC+GC)
GWP	Potencial de Aquecimento Global (<i>Global Warming Potential</i>)
IBA	Industria Brasileira de Árvores
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	Imposto de Renda
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KCL	Cloreto de Potássio
LII	Limite Inferior de Inflamabilidade
LSI	Limite Superior de Inflamabilidade
mdc	Metros cúbicos de carvão
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MDM	Octametiltrisiloxano
MP	Material Particulado
Mtep	Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
NPK	Fertilizante que contém Nitrogênio, Fósforo e Potássio
ORC	Ciclo Orgânico de Rankine (<i>Organic Rankine Cycle</i>)
ODP	Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (<i>Ozone Depletion Potential</i>)
PAS	<i>Publicly Available Specification</i>
PASEP	Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PCH	Pequenas Centrais Hidroelétricas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PIB	Produto Interno Bruto
PIS	Programa de Integração Social
RG	Rendimento Gravimétrico de Carvão

RSNC	Redução Seletiva Não Catalítica
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SI	Sistema Internacional
SIN	Sistema Interligado Nacional
SSP	Superfosfato Simples
TA	Taxa Mínima de Atratividade
TAC	Temperatura de Chama Adiabática
Tci	Índice limite de combustão (<i>Threshold combustion index</i>)
Tep	Toneladas equivalente de petróleo
TIR	Taxa Interna de Retorno
UC	Unidade de Produção de Carvão Vegetal
UF	Unidade Funcional
UNECFE	United Nations Economic Commission For Europe
UNFCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
VC	Volume de Controle
VPL	Valor Presente Líquido
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

CAPÍTULO 1. PROPOSTA DA TESE

1.1. Contextualização

1.2. Motivação e Alcance da Tese

1.3. Hipótese da Tese

1.4. Objetivos

1.5. Metodologia

1.6. Apresentação da Tese

1.7. Adequação da Tese as Linhas de Pesquisas da Pós-Graduação

1.1. Contextualização

O Brasil é o maior fabricante de carvão vegetal, responsável por 14% da produção global. Este fato é consequência do seu uso no setor siderúrgico, que consome cerca de 81% do produto, onde é utilizado como redutor para produção de aço e ligas ferrosas. De acordo com dados do Balanço Energético Nacional, em 2014 a produção brasileira de carvão vegetal foi de 6,301 milhões de toneladas (BEN, 2015; IEA, 2012; FAO, 2012).

O carvão vegetal é um produto resultante da pirólise da biomassa, termo utilizado para caracterizar a decomposição térmica de materiais na ausência de oxigênio. Quando o objetivo da pirólise é apenas a obtenção de carvão é comum nomear o processo como carbonização ou carvoejamento. O carvão tem sido o principal produto comercial da biomassa por muito tempo e, ainda hoje, é o biocombustível processado produzido em maior quantidade. Tanto em tempos históricos, como agora, fornos de carvão vegetal relativamente simples são os responsáveis por prover um combustível de alta qualidade e de baixo custo. Sua importância histórica foi grande na idade do Bronze (3000 a.C.), onde desempenhou papel chave na metalurgia dos metais, possibilitando a purificação de minérios a altas temperaturas.

A crescente industrialização da sociedade resultou, primeiramente, no consumo de madeira para produção de carvão vegetal para seu uso na produção de ferro, que foi então, amplamente substituído pelo coque de carvão mineral, mais barato e menos intensivo em mão de obra. Ainda no Brasil, o carvão vegetal é usado na produção de ferro gusa, devido à escassez de jazidas de carvão mineral de qualidade para produzir o coque e a políticas públicas que, por

exemplo, limitaram a importação de coque na década de 80. No início dos anos 2000, o intenso desenvolvimento da China transformou esse país de exportador de coque a um importador de ferro-gusa, fato que encareceu o coque no mercado internacional e, conseqüentemente, estimulou a produção do carvão vegetal no Brasil (AMS, 2004).

Em geral, a carbonização é realizada em equipamentos simples, os fornos de carbonização, onde ocorre a combustão parcial da madeira em ambiente com fonte limitada e controlada de oxigênio. Existem diversos tipos e classificações para estes fornos, entretanto, a análise deste trabalho tem foco nos grandes fornos retangulares, usados em produções de larga escala.

A carbonização tem como subprodutos o ácido pirolenhoso, alcatrão insolúvel e gases não condensáveis. Estes produtos, condensáveis e não condensáveis, são emitidos pelas chaminés dos fornos de carbonização, e correspondem a aproximadamente 40% do conteúdo energético da madeira, representando um desperdício energético (Overend, 2004).

Os gases da carbonização, quando não utilizados, podem causar poluição da água, solo e ar (Chidumayo, 2013). Infelizmente, nos grandes sistemas industriais, a recuperação destes subprodutos para venda não é economicamente viável, pois competem diretamente com os derivados de petróleo. Antes do avanço da petroquímica, a pirólise da madeira em retortas provia uma grande quantidade de produtos químicos além do carvão, principalmente o metanol e ácido acético, pela utilização dos gases condensáveis, enquanto os gases não condensáveis eram queimados e usados como fonte de calor no sistema, para aumentar a eficiência global do processo (FAO, 1987). Esta indústria perdeu força após a produção sintética de ácido acético e metanol a partir do petróleo se tornar extensiva.

A tecnologia utilizada no processo de carbonização pouco mudou nos últimos séculos. Além de ineficiente do ponto de vista energético, no Brasil, o setor tem sido acusado de causar desmatamento e poluição do ar. A estimativa para o Brasil da ABRAF (ABRAF, 2013) é que do total de carvão consumido 55% seja proveniente de florestas nativas e 45% de florestas plantadas. Porém, segundo aos dados da IBA (2015), o percentual de carvão proveniente de matas nativas seria de 16% em 2014.

Também é crescente a preocupação com a saúde dos trabalhadores sujeitos a poluição gerada pela falta de controle na emissão dos gases gerados pelos fornos (Gomes, 2012). Entretanto, a combustão dos subprodutos para produção de energia, em temperaturas e tempos de residência adequados, pode decompor componentes do gás de pirólise em substâncias menos nocivas ao ambiente, por exemplo, o gás metano gerado na carbonização é transformado em

CO₂ e H₂O durante sua queima, o qual possui um potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o gás carbônico, considerando um horizonte de 100 anos (IPCC, 2007).

Atualmente, a indústria de carvão vegetal possui dois gargalos: impactos ambientais e a baixa eficiência energética do processo. Para que o setor continue crescendo em um mercado cada vez mais competitivo é necessária inovação. Em razão do baixo nível tecnológico do setor há um grande espaço para progressos, entretanto, há um desafio em realiza-los: afetar um importante aspecto do carvão vegetal, seu baixo custo de produção. Razão pela qual o país é um dos únicos fabricantes do produto em escala industrial capaz de competir com o coque de carvão mineral.

O carvão vegetal está inserido no mercado globalizado e competitivo de ferro gusa e ligas metálicas, onde o objetivo é, invariavelmente, a diminuição de custos. Este fato motivou as grandes empresas do mercado a substituir os pequenos fornos tipo colmeia pelos grandes fornos retangulares, que requerem menos mão de obra, fator com alto peso nos custos totais de produção. Apesar de antigas e tecnologicamente comprovadas, tecnologias mais avançadas e eficientes que os fornos retangulares, como retortas e fornos metálicos, entre outras, encontram uma grande resistência de ordem econômica em sua aplicação, pois apesar de mais eficientes na relação tonelada de carvão produzida sobre tonelada de madeira consumida, encarecem, em primeira análise, o custo de instalação das unidades de produção de carvão. Porém, estudos como o de Moura (2015) mostram que um aumento no rendimento gravimétrico de carvão e mesmo o aproveitamento energético dos gases tem um impacto positivo significativo na viabilidade econômica dos empreendimentos, o que pode justificar a o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias mais avançadas.

Por ser a tecnologia mais aplicada nas Unidades de Carbonização (UCs) modernas, este trabalho irá focar esforços na avaliação do uso energético dos gases produzidos por fornos retangulares para a produção de eletricidade.

O estado de Minas Gerais detém o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo e tem se destacado como o maior produtor e consumidor desse insumo energético, atingindo a marca de 21,908 milhões de MDC (Metros Cúbicos de Carvão) no ano de 2007, que corresponde a três quartos do total produzido no Brasil (AMS, 2009).

1.2. Motivação e Alcance da Tese

Historicamente, sabe-se que o grau de desenvolvimento de um país relaciona-se diretamente com a quantidade de energia produzida por ele. É notório que países com alta atividade econômica e industrial são responsáveis pelos maiores índices de consumo de energia comparados aos de menor atividade. Portanto, energia e desenvolvimento são conceitos fortemente ligados, motivo pelo qual se pode assegurar que o progresso da sociedade depende de um abastecimento energético amplo, econômico e de qualidade. Deve-se inserir nesta equação um fator relacionado à eficiência energética, onde uma unidade de energia é capaz de produzir mais bens em um país energeticamente eficiente, em comparação a um país de baixa eficiência energética. Por exemplo, o Japão, com o terceiro maior PIB do mundo, produz pouca energia e é obrigado a importar a maior parte dela (cerca de 91%), ambiente que cria um importante incentivo econômico para se evitar desperdícios energéticos. De acordo com os dados de intensidade energética da IEA (2015) para cada dólar de PIB, Japão e Alemanha consomem cerca de 5 MJ de energia, os EUA precisam de 8 MJ e o Brasil de 11 MJ.

A oferta de energia primária no mundo passou dos 6.106 Mtep em 1973 para 13.371 Mtep em 2012 (IEA, 2015). Atualmente, os combustíveis fósseis como o petróleo, gás natural e carvão representam mais de 80% do consumo total de energia primária no mundo e, apesar dos esforços no desenvolvimento de energias alternativas renováveis, os combustíveis fósseis serão o recurso predominante pelo menos durante os próximos 50 anos (IEA, 2010). No Brasil, a oferta interna de energia é de aproximadamente 305,6 Mtep, onde o setor industrial é responsável por 32,9% do consumo e o setor de transportes 32,5% (BEN, 2015).

Em relação à produção de eletricidade, sabe-se que a maior parte dos insumos energéticos usados para sua geração ainda são de origem fóssil, com domínio amplo do carvão fóssil (~40%), embalado nos últimos anos pela China, o qual, entretanto, já mostra sinais de estabilização. Hoje a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis já ultrapassa o gás natural e tomou o 2º lugar dentre as fontes de energia e, segundo a IEA (2016), a partir 2030 as fontes renováveis devem se tornar a principal fonte de eletricidade no Mundo.

Nas últimas décadas, tem-se reconhecido que o consumo excessivo dos recursos energéticos não renováveis leva, invariavelmente, a um aumento na taxa de esgotamento das reservas, e a um impacto negativo nos custos da energia e na qualidade do meio ambiente em níveis globais e regionais. De fato, apesar de existirem controvérsias em relação ao estoque de energia não renovável, pode-se dizer que os recursos fósseis estão, a cada dia, mais próximos

de uma fase de declínio de produção o que, aliado a fatores como o aumento nos custos de extração/produção e especulação, tornam os produtos energéticos derivados destes recursos como a gasolina, o diesel, e a eletricidade, cada vez mais caros. Estes fatores vem, ao longo das últimas décadas, incentivando e viabilizando a utilização de fontes de energia renováveis e menos agressivas ao meio ambiente.

Dentre as fontes alternativas, destaca-se a utilização energética da biomassa, Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), energia solar, energia eólica, Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs), energia geotérmica, entre outras, que apresentam incontestáveis vantagens sociais e ambientais e, por isso, há um constante interesse em sua utilização para suprir as crescentes necessidades energéticas do mundo.

Para aproveitar estas novas fontes de energia, é preciso avaliar e adotar diferentes tecnologias de conversão energética dos insumos energéticos renováveis. Nesse sentido, tecnologias como o Ciclo Orgânico de Rankine (ORC), o ciclo Kalina, Turbinas a Gás de Queima Externa (EFGT), motores Stirling e os Ciclos Combinados são comumente considerados quando se almeja viabilizar tecnicamente, economicamente e ambientalmente o uso das fontes de energia renovável, seja para o fornecimento de energia elétrica, ou em sistemas de cogeração para produção conjunta de trabalho, calor e frio.

Hoje existe um considerável potencial para a inclusão de energia renovável no país através do aproveitamento energético dos gases da carbonização. Por exemplo, o estado de Minas Gerais chegou a produzir, aproximadamente, 6.000.000 de toneladas de carvão vegetal anualmente. Em uma estimativa preliminar, considerando que 36% da energia da madeira é perdida na forma de gases da carbonização, e o uso desta energia em um ciclo térmico com 25% de eficiência, pode se produzir aproximadamente 1 MWh_e por tonelada de carvão. Ampliando para as UCs do estado de Minas Gerais, chega-se a um potencial de 6.000 GWh por ano de energia renovável passível de ser gerada no estado anualmente, o equivalente a 56% do consumo residencial de eletricidade do estado em 2014, que foi de 10.699 GWh (BEN, 2015).

O potencial de converter materiais lignocelulósicos em carvão e bio-óleo tem gerado novos interesses acerca da pirólise da biomassa. O carvão vegetal tem a capacidade de melhorar solos e de sequestrar carbono, enquanto o bio-óleo vem sendo estudado como matéria prima para produzir combustíveis de segunda geração. Recentes estudos tem mostrado a viabilidade técnica em converter bio-óleo biocombustíveis líquidos como álcoois (álcool e metanol) e hidrocarbonetos (gasolina e diesel) (García-Pérez et al., 2010), e o Brasil tem a oportunidade de exercer um importante papel neste cenário global. Investir em tecnologias de pirólise e de

aproveitamento dos gases da carbonização tornaria o carvão vegetal, além de renovável, um combustível definitivamente limpo e ainda com a opção de agregar uma nova fonte de energia alternativa ao parque energético brasileiro.

1.3. Hipóteses da Tese

Nesta pesquisa, pretende-se discutir as principais questões envolvidas em torno da aplicação de um sistema de geração de eletricidade a partir dos gases residuais do processo de carbonização da madeira em fornos retangulares, avaliando seus impactos ambientais, técnicos e econômicos. A tese tenta avaliar os pontos listados a seguir, tendo por base um estudo de caso realizado na UC da Plantar Siderúrgica localizada em Itacambira (MG) (Fazenda Tamanduá e Poções):

- [1] Determinação do potencial energético dos gases de carbonização produzidos na UC.
- [2] Avaliação do funcionamento sincronizado de vários fornos de carbonização, em sistemas de *cluster*¹, pois cada forno opera um ciclo que inclui as etapas de carregamento, carbonização e resfriamento, e somente durante a carbonização ocorre a liberação de gases combustíveis e ainda de maneira não constante em função das fases da pirólise.
- [3] A tecnologia aplicada pode requerer a necessidade da utilização de quantidades consideráveis de água para o resfriamento do ciclo térmico que será instalado nas UCs. Portanto, se torna importante avaliar tecnologias menos intensivas no uso da água, visto que muitas UCs se encontram em regiões com baixa disponibilidade de água.
- [4] Analisar a mudança dos aspectos ambientais considerando o cenário base (produção de carvão nos estado atual, sem o aproveitamento dos gases) e um cenário alternativo com o aproveitamento do gás para a produção de eletricidade.

¹ Neste trabalho entende-se como *cluster* (do inglês, aglomerado ou conjunto) um conjunto de fornos de carbonização sistematizados de modo a trabalharem como se fossem apenas uma unidade emissora de gases de carbonização.

1.4. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar a viabilidade da geração de eletricidade a partir dos gases residuais resultantes do processo de carbonização de *Eucalyptos spp.* em fornos retangulares operados em *cluster*, tendo por base de informações o contexto existente na UC da Plantar Siderúrgica S.A, localizada em Itacambira, MG. Serão comparadas tecnologias capazes de realizar tal conversão energética, que estejam disponíveis no mercado, do ponto de vista técnico, de modo a encontrar dados suficientes e consistentes para a tomada de decisão visando a aplicação de tais tecnologias.

Objetivos específicos:

- Levantamento de dados e execução do balanço de massa e energia do processo de carbonização nos fornos retangulares da UC;
- Determinação do potencial energético do *cluster* de fornos retangulares a partir da vazão e composição média dos gases de exaustão, avaliando se há garantia de que a operação do *cluster* possa assegurar um fornecimento contínuo de energia ao grupo gerador. Como ferramenta para auxiliar na questão, será realizada uma modelagem do *cluster* para cada unidade produtiva (forno retangular) visando à obtenção de uma vazão e composição médias para que o sistema opere sem restrições e dentro de uma faixa confiável;
- Avaliar diferentes opções tecnológicas para geração de eletricidade com o aproveitamento energético dos gases de carbonização para a geração de eletricidade. Realizando para tanto, a modelagem das tecnologias consideradas com ajuda de simuladores comerciais.
- Analisar e discutir os principais aspectos da combustão dos gases de carbonização no queimador da Plantar Siderúrgica S.A.
- Elaborar o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do carvão vegetal e do eucalipto produzido na UC da Plantar Siderúrgica localizada em Itacambira-MG. Bem como, avaliar ambientalmente, através de uma Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) as possíveis implicações ambientais que a geração de eletricidade poderá causar no sistema. Tanto o ICV quanto a AICV serão elaborados de acordo com as normas ISO 14040 (2006).

1.5. Metodologia

As informações teóricas necessárias para cumprir os objetivos foram obtidas através de revisão da literatura. Dados práticos sobre o funcionamento da UC, a composição dos gases de carbonização e sobre sua combustão em queimadores foram obtidas através de visitas técnicas realizadas na UC da Plantar Siderúrgica.

Para a avaliação do potencial energético foi elaborado um software em Excel/VBA para realizar os cálculos sobre as características energéticas dos gases e o resultado do funcionamento em *cluster* do sistema de fornos retangulares. As modelagens termodinâmicas das tecnologias de conversão energética foram realizadas no software comercial Gate Cycle® e Excel®. As informações do ICV foram obtidas na literatura e com dados obtidos na UC Itacambira, a Análise do Ciclo de Vida (ACV) foi realizada com o auxílio do software Simapró®.

Os dados referentes à composição dos gases de carbonização produzidos nos fornos retangulares foram obtidos por medições realizadas pelos Laboratórios Integrados de Química, Celulose e Energia, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (LQCE/ESALQ/USP), nos fornos retangulares da Plantar em 2010. A metodologia utilizada e os resultados obtidos podem ser visualizados no APÊNDICE I.

Também, foi realizado o acompanhamento de testes de queima do gás de carbonização no queimador de gases da Plantar, localizado na UC de Itacambira (MG), onde foram conectados ao equipamento fornos de carbonização em diferentes estágios de carbonização. Durante o teste foi medido de maneira contínua o perfil de temperatura do equipamento e, quando possível, foram coletados dados da composição de Metano e Oxigênio na entrada e na saída do queimador por um analisador portátil.

1.6. Apresentação da Tese

A tese está dividida em 7 capítulos, os quais serão resumidos a seguir:

Capítulo 1. Proposta da tese. Contextualização. Justificativa. Objetivos. Alcance do trabalho

Capítulo 2. Revisão da bibliografia. Fundamentos da pirólise da madeira visando à produção de carvão, a indústria de carbonização no Brasil, a carbonização em fornos retangulares, tecnologias de conversão energética (ORC, EFGT e Ciclo Rankine) e ACV.

Capítulo 3. Combustão dos gases da carbonização. Princípios da combustão. Queimadores de gases da carbonização. Resultados dos testes no Queimador da UC Itacambira e discussão sobre a problemática da queima dos gases de carbonização. Cálculos relacionados à inflamabilidade dos gases da carbonização gerados nos fornos retangulares.

Capítulo 4. Potencial energético dos gases da carbonização gerados em fornos retangulares. Composição média dos Gases. Balanço de Massa e energia. Funcionamento do Sistema em *cluster*. Determinação do Potencial Energético do Sistema. Avaliação das tecnologias de conversão energética, com modelagem dos sistemas: ORC, EFGT e Ciclo Rankine a Vapor. Comparação entre as tecnologias através de uma análise econômica

Capítulo 5. Análise do Ciclo de Vida. Objetivos; Limites do Sistema; ICV do carvão vegetal e do eucalipto; Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (*Avaliar o impacto da queima de gases e da geração de eletricidade*).

Capítulo 6. Conclusões. São apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 7. Referências Bibliográficas.

1.7. Adequação da Tese as Linhas de Pesquisas da Pós-Graduação

De acordo com o programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, o presente trabalho pode-se enquadrar na seguinte linha de pesquisa:

- [1] Nível do Programa: Doutorado em Engenharia Mecânica
- [2] Linha de Pesquisa: Conversão de energia
- [3] Áreas correlatas: Termodinâmica, transferência de calor, geração elétrica, pirólise de biomassa, melhora de processos, simulação de processo de conversão de energia e ACV.
- [4] Técnicas: Simulação matemática.

CAPÍTULO 2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1. Carbonização e Produção de Carvão Vegetal

2.2. A indústria de Carbonização no Brasil

2.3. Produção de Carvão Vegetal em Fornos Retangulares

2.4. Análise do Ciclo de Vida

2.5. Tecnologias de Conversão Energética

2.1. Produção de Carvão Vegetal

A produção de carvão vegetal é um dos acontecimentos mais antigos de que se tem conhecimento. Desenhos na pedra feitos de carvão com mais de 38.000 anos de idade podem ser encontrados na caverna Chauvet no sul da França (Figura 2.1) e relatam que o carvão é o primeiro material sintético produzido pelo homem, quando o resíduo carbonáceo (carvão) resultante das fogueiras era utilizado na pintura rudimentar em pedra.



Figura 2.1. Desenhos feitos com carvão na Caverna Chauvet (The Guardian, 2015).

Cerca de 500 anos antes de Cristo, os macedônios já empregavam a madeira para obtenção de carvão e alcatrão, ainda antes, a carbonização da madeira era conhecida e praticada por egípcios, persas e chineses. Os egípcios usavam o ácido pirolenhoso, um produto da produção

de carvão vegetal, para o embalsamento dos mortos. No século XIX, antes da química sintética orgânica se tornar estabelecida, a carbonização da madeira provia diversos produtos industriais de grande importância, como a acetona, ácido acético e metanol (ainda conhecido como *Wood Alcohol*) (Speight, 2002). Hoje o carvão vegetal é muito utilizado na siderurgia como redutor, na cocção de alimentos, como carvão ativado e em aplicações da indústria de semicondutores. Os dois últimos, devido a sua boa capacidade reativa, elevada condutividade elétrica, e pureza frente ao carvão fóssil, que contém mais nitrogênio, enxofre e metais pesados.

O carvão vegetal é um produto da madeira, obtido mediante seu aquecimento em ausência de ar, total ou parcial, em relação à quantidade de ar necessária para a que a combustão completa ocorra. Este aquecimento libera os componentes voláteis da madeira, deixando um combustível mais limpo, de menor peso e de maior teor energético (aproximadamente de 18 para 30 MJ/kg - PCI). Este processo é genericamente denominado como carbonização da madeira. Por sua vez a carbonização pode ser definida como um processo de decomposição térmica realizado com o objetivo de converter uma substância que contém carbono em carvão ou resíduos de carvão, efetivado por processos naturais, pelo aquecimento ou pela queima parcial da substância (Cleveland e Morris, 2006; Nogueira e Lora, 2003).

A carbonização está inserida dentro dos processos de conversão termoquímica da biomassa. Este processo, também chamado de termólise, inclui um diverso número de rotas para produzir a partir da biomassa original uma série de matérias primas, produtos químicos e combustíveis. A base da conversão termoquímica da carbonização é a pirólise (Basu, 2010).

A pirólise pode ser simplesmente definida como o processo de decomposição pelo calor (Cleveland e Morris, 2006), e abrange todas as mudanças químicas que ocorrem quando calor é aplicado a um material na ausência total ou parcial de oxigênio a uma taxa de aquecimento específica até uma temperatura máxima, conhecida como temperatura de pirólise ou temperatura final, onde se mantém esta temperatura por um período de tempo determinado. A palavra deriva do grego *pyr* (fogo) e *lysis* (desprendimento), ou seja: “decomposição pelo calor”. Durante a pirólise, moléculas grandes e complexas de hidrocarbonetos são quebradas em moléculas mais simples (Basu, 2010; Antal, 2003).

Na pirólise, no ambiente de reação, ocorre a volatilização de parte dos componentes da madeira, concentrando-se o parte do carbono na fase sólida. Assim, concentra-se o carbono e eliminam-se os demais componentes que contem hidrogênio e oxigênio. Em geral, os

produtos da pirólise da biomassa são divididos em gases condensáveis, gases não condensáveis e carvão vegetal.

Observando a Figura 2.2 abaixo, que mostra um modelo simplificado da cinética das reações da pirólise, nota-se que a reação primária é a degradação da biomassa em gás, alcatrão e carvão. Quando a temperatura aumenta, o alcatrão se decompõe em gás, líquido e carvão através de reações secundárias. As 3 reações primárias são endotérmicas, já as secundárias que formam gás, líquido e carvão são exotérmicas. As reações primárias têm início em 200 °C, já as reações secundárias tem início em 280 °C (Fantozzi et al., 2007).

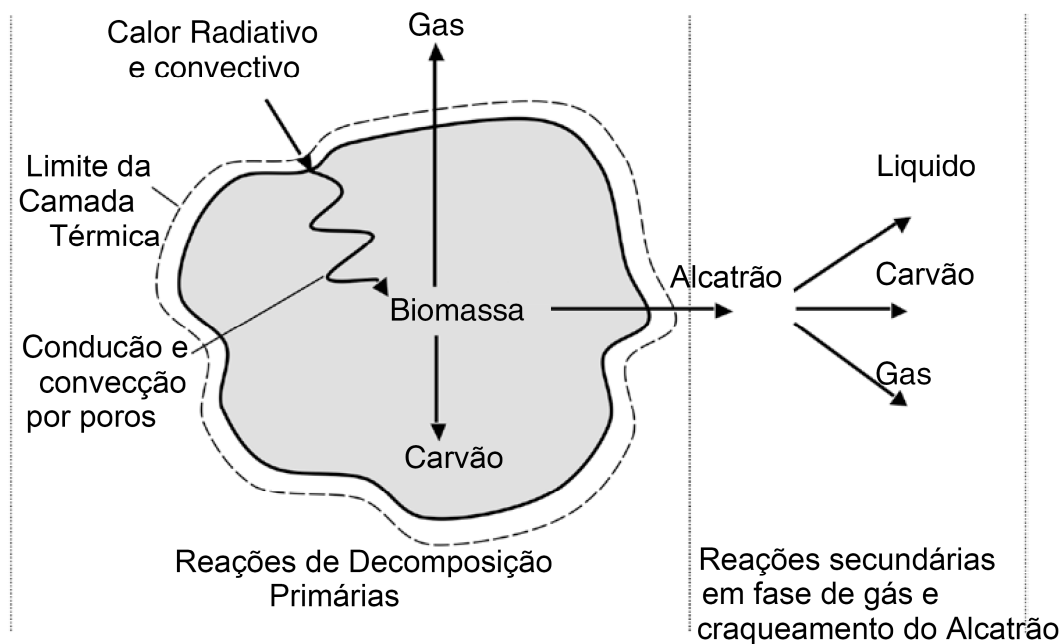
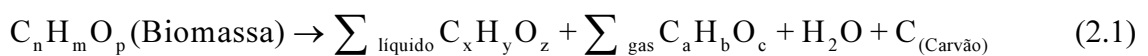
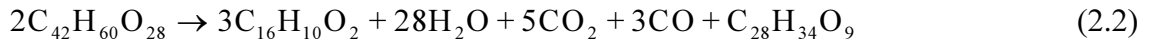


Figura 2.2. Pirólise de uma partícula de Biomassa (Basu, 2010).

Esta decomposição secundária ocorre parcialmente através de reações homogêneas em fase gasosa e por reações térmicas heterogêneas em fase gás-sólida. Nas reações em fase gasosa, o vapor condensável é craqueado em moléculas menores de componentes permanentes não condensáveis como CO e CO₂. O processo pode ser representado pela Eq. 2.1 genérica (Basu, 2010):



Uma das razões para o baixo rendimento de carvão pode ser analisado pela equação 2.2.



A reação representada pela Eq. 2.2 representa a transformação abrupta de madeira em vapor de alcatrão, uma complexa combinação de componentes orgânicos misturados com gases não condensáveis entre 250 e 400 °C. Como os vapores de alcatrão escapam rapidamente da região aquecida do reator (zona de reação), não estabelecem o equilíbrio e não formam o carvão através das reações secundárias. Nota-se que o rendimento de material sólido carbonáceo, $\text{C}_{16}\text{H}_{10}\text{O}_2$ (carvão vegetal no caso) é 36,7% em massa e os vapores de alcatrão ($\text{C}_{28}\text{H}_{34}\text{O}_9$) constituem uma perda significativa de carbono.

Nas reações secundárias da Figura 2.2, os vapores de alcatrão são decompostos rapidamente sobre a superfície da partícula de carvão vegetal para gerar carbono e um gás secundário composto majoritariamente por água, gás carbônico, metano, hidrogênio e monóxido de carbono. É através do mecanismo secundário de reações que se consegue obter maiores ganhos de produtividade de carvão. Portanto o tempo de residência destes vapores ao redor e no interior da partícula é de extrema importância para favorecer um alto rendimento de carvão.

Este fenômeno é perceptível na Figura 2.3, a qual mostra valores medidos de resíduos sólidos (carvão vegetal), seu conteúdo de carbono fixo e o rendimento de carbono fixo para duas taxas de aquecimento. Nota-se que, por exemplo, com a taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, quando a temperatura final salta de 300 °C para 400 °C, o rendimento de carbono fixo vai de 15% para 21%, agora com a taxa de 2°C/min o rendimento passa de 19% para 25%. Isto ocorre pois a medida que a taxa de aquecimento aumenta, o tempo de residência dos voláteis na zona de reação em situação de baixa temperatura diminui, e como a maioria das reações que favorecem a formação de carvão ocorrem em menor temperatura, consequentemente, induz-se a um resultado final com menor rendimento de sólidos (carvão vegetal). Entretanto, cabe ressaltar que outros fatores também podem influenciar neste rendimento, como a temperatura final de carbonização, umidade do material e o tamanho das partículas.

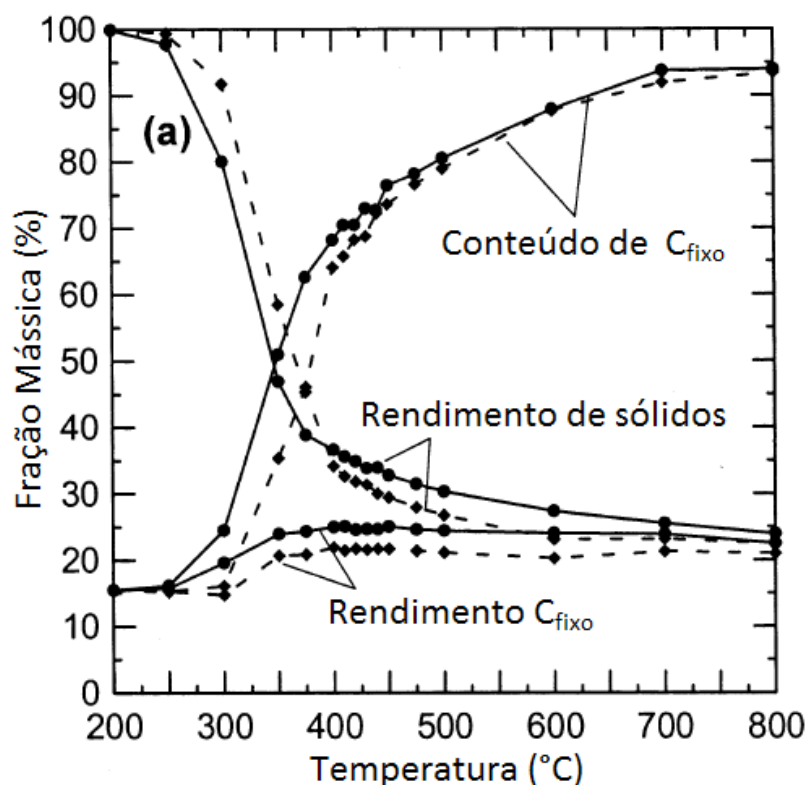


Figura 2.3. Efeitos da temperatura final e da taxa de aquecimento nos rendimentos de carvão.

As linhas sólidas e tracejadas representam taxas de aquecimento de 2 e 10 °C/min, respectivamente (Schenkel, 1999).

As dimensões da partícula irão determinar a taxa de aquecimento em seu interior, principalmente se tratando de materiais lignocelulósicos, como a madeira, que são maus condutores de calor. Por consequência, a granulometria da biomassa a ser pirolisada terá influência direta nos rendimentos da carbonização (Overend, 2004). Por isso, na pirólise rápida, que prioriza a formação da fase líquida, é preferível que as dimensões das partículas da madeira sejam menores. Segundo Zhang (2010), madeiras com maior teor de lignina e menor teor de hemicelulose levam a um maior rendimento de carvão.

Em resumo, qualquer fator nas condições da pirólise que leve ao aumento do contato entre os vapores primários e o carvão, incluindo alta pressão, baixa vazão dos vapores, grandes partículas ou baixa taxa de aquecimento irá provavelmente favorecer a formação de carvão em detrimento da fase líquida através do incremento das reações secundárias. Como estas reações desprendem energia, a pirólise tende a ser mais exotérmica nestas condições (Brownsort, 2009).

Continuando a análise da Figura 2.3, pode-se perceber que o conteúdo de carbono fixo atinge uma assíntota com o aumento da temperatura de pirólise, indicando que o valor limite assintótico é uma importante propriedade do material na carbonização. Nota-se também que o rendimento de carbono fixo torna-se cada vez mais próximo do rendimento de sólidos à medida que se aumenta a temperatura, mostrando que a temperaturas mais altas o carvão produzido irá apresentar menor quantidade de sólidos voláteis, porém terá maior qualidade (em termos de carbono fixo).

A Figura 2.4, resume o efeito do aumento da temperatura final no processo de carbonização, onde observar-se o aumento do conteúdo de carbono fixo, diminuição no resíduo sólido final (carvão vegetal) e diminuição da resistência físico-mecânica.

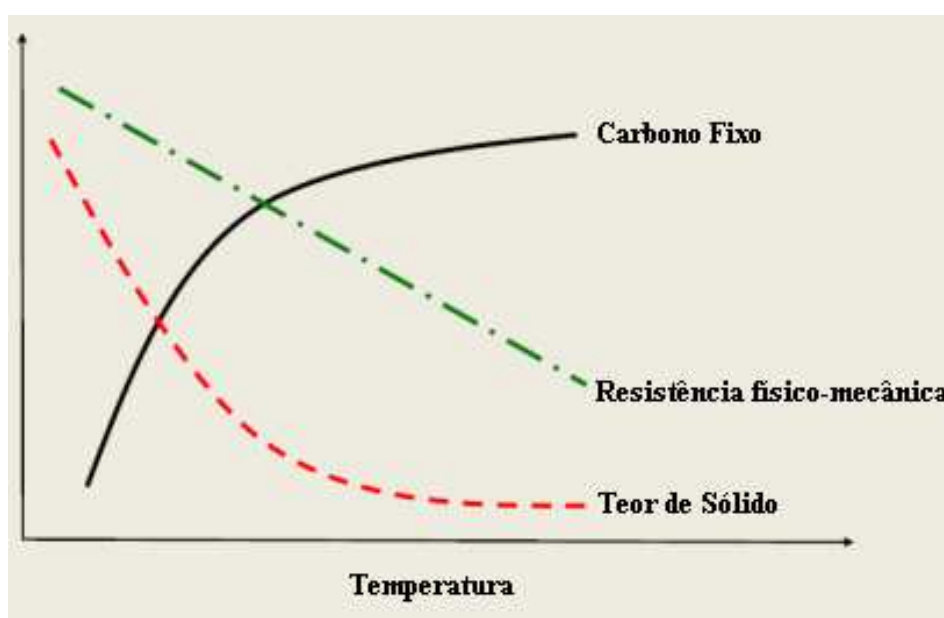


Figura 2.4. Efeito da temperatura de pirólise no produto sólido da carbonização (Brito,2010).

A pirólise da madeira pode ser realizada de diversas maneiras, combinando tempos de residência dos vapores na zona de reação, e diferentes temperaturas finais. Estes fatores dividem a pirólise em, basicamente três tipos: pirólise rápida, intermediária e lenta, como mostra a Tabela 2.1, e tem relação direta no rendimento de produtos sólidos, líquidos e gasosos.

Tabela 2.1. Produtos característicos da pirólise da Biomassa (base seca) (Lohria et al., 2016).

Modo	Condições	Líquido	Carvão	Gás
Rápida	Temperatura moderada (~500 °C). Baixo tempo de residência dos vapores ~ 1 segundo	75%	12%	13%
Intermediária	Temperatura moderada (~500 °C). Tempo moderado de residência dos vapores quentes ~10-20 segundos	50%	20%	30%
Lenta (Carbonização)	Temperatura baixa (~400 °C). Tempo muito alto de residência	30%	35%	35%

Pequenos tempos na zona de reação combinados com elevadas temperaturas geralmente favorecem o rendimento de produtos líquidos. Em contraste, a pirólise lenta, com baixas temperaturas e alto tempo de residência induz a formação de quantidades similares dos três produtos. Combinando os fatores mencionados acima, pode-se concluir que para maximizar a produção de carvão, baixas temperaturas e baixas taxas de aquecimento são necessárias. Mohan et al., (2006), apresentam as tecnologias de pirólise da biomassa tipicamente utilizadas para se atingir os objetivos do processo (Tabela 2.2), gerar carvão, bio-óleo (fase líquida) ou gás. Nota-se que para a produção de carvão a tecnologia de pirólise empregada é a carbonização, por isso também chamada de pirólise lenta. Entretanto, nota-se pela própria falta de exatidão das definições de tempo e taxa de aquecimento da Tabela 2.2, que não existem limiares definidos para classificar tais tecnologias, mas sim uma ideia geral dos valores de tais parâmetros com as tecnologias correlacionadas.

O equilíbrio químico da pirólise da celulose é apresentado na Figura 2.5 para diferentes temperaturas finais, a qual mostra que sob temperaturas moderadas (~400 °C) o carvão é um dos produtos majoritários, o que explica o motivo do homem ter dominado a tecnologia de produção de carvão vegetal já nos estágios iniciais da civilização (Antal, 2003). Estas previsões de equilíbrio químico estabelecem os limites teóricos de produção de carbono que pode ser obtido a partir de uma determinada matéria-prima

Tabela 2.2. Comparativo das tecnologias de pirólise (Mohan et al., 2006)

Tecnologia	Tempo de Residência	Taxa de aquecimento	Temperatura Final (°C)	Produtos predominantes
Carbonização	dias	Muito baixa	400	carvão
Pirólise Convencional	5-30 min	baixa	600	óleos, gás e carvão
Pirólise Rápida	0.5-5 s	muito alta	650	óleos
Flash-liquido	<1 s	alta	<650	óleos
Flash-gas	<1 s	alta	<650	químicos, gás
ultra	<0.5 s	muito alta	1000	químicos , gás
vácuo	2-30 s	média	400	óleos
hidro-pirólise	<10 s	alta	<500	óleos
metano-pirólise	<10s	alta	<700	químicos

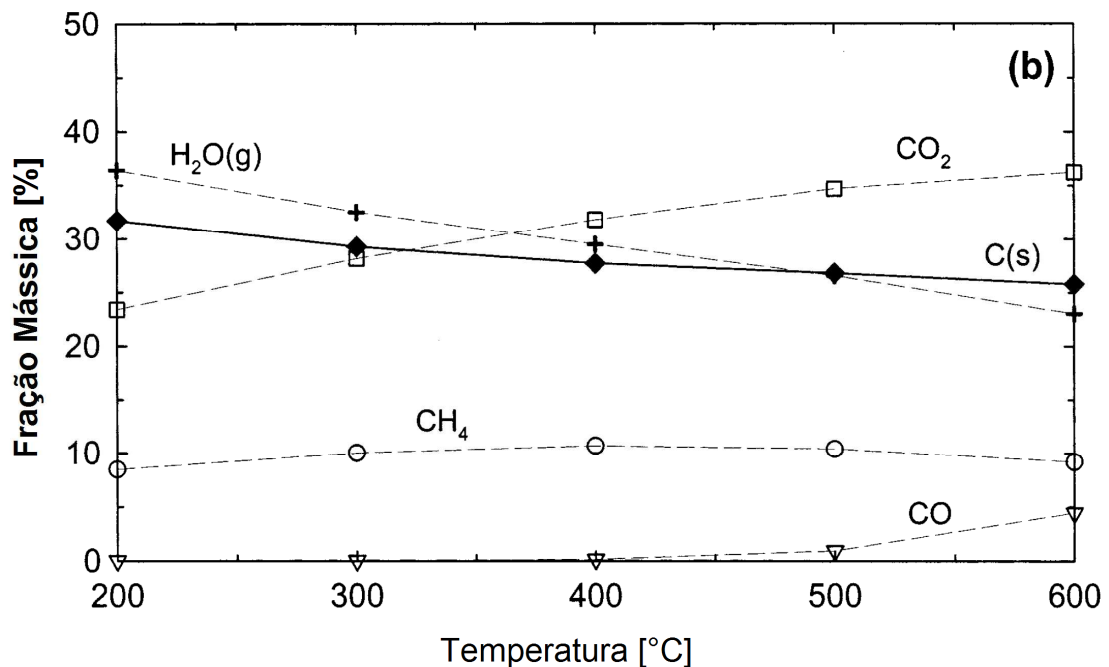


Figura 2.5. Efeito da temperatura nos produtos da pirólise da celulose com o equilíbrio termoquímico a diferentes temperaturas. (Reynolds, 1987).

Em estudos realizados em laboratório, no emprego de sistemas com fornecimento externo de energia, sabe-se que a umidade da madeira serve como catalisador para as reações que promovem a formação de carvão, o que em tese aumentaria o rendimento de carbono (Antal, 2003). Entretanto, como a maioria dos fornos industriais de carbonização são auto térmicos, ou seja, que queimam internamente parte do insumo (madeira) para suprir energia para as reações, mais água na madeira significa que mais energia da madeira será necessária para suprir o calor latente de vaporização da água, diminuindo em contrapartida os rendimentos de

carvão. Outros catalisadores que incrementam o rendimento de carvão são os componentes minerais da madeira, como o potássio (Overend, 2004; Antal, 2003).

O conteúdo de carbono fixo ideal para o carvão vegetal depende diretamente do seu uso. Carvão para uso doméstico para cocção de alimentos tem de 20-30% de Material volátil (MV), já para a metalurgia este valor deve estar entre 10-15% ou menos. O conteúdo de cinzas deve estar entre 0,5-5%, o que resulta em um poder calorífico que pode variar de 28 a 33 MJ/kg (Domac, 2008). O rendimento de carbono fixo e o conteúdo de carbono fixo pode ser calculado pelas equações 2.3 e 2.4, respectivamente. Brito (1990) apresenta a relação entre as substâncias presentes na madeira antes e após a carbonização para a produção de carvão vegetal (Figura 2.6).

$$\%Cf = 100 - \%MV - \%Cinzas \quad (2.3)$$

Em que,

$\%Cf$ = conteúdo de carbono fixo (%)

$\%MV$ = conteúdo de material volátil presente no carvão após a carbonização (%)

$\%Cinzas$ = conteúdo de cinzas presente no carvão (%)

$$Re_{Cf} = Re_{carvão} \times [\%Cf / (100 - \%Cinzas_{insumo})] \quad (2.4)$$

Em que,

Re_{Cf} = rendimento de carbono fixo

$Re_{carvão}$ = rendimento de carvão

$\%Cinzas_{insumo}$ = conteúdo de cinzas no insumo (madeira)

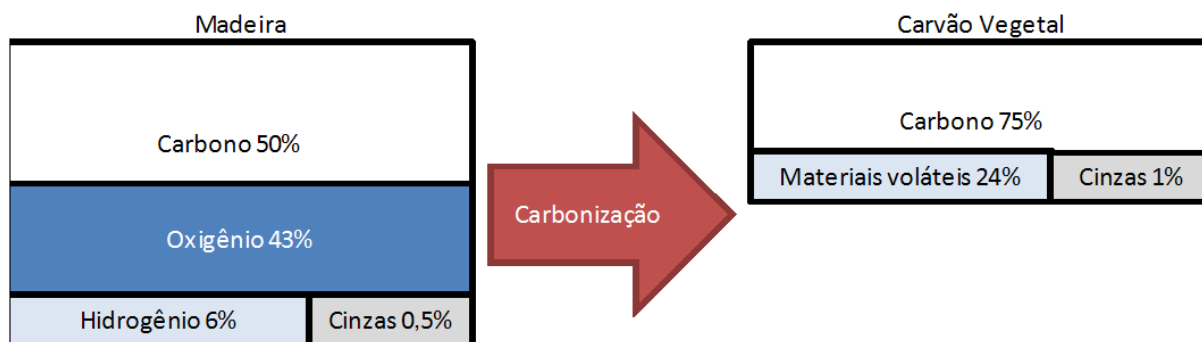


Figura 2.6. Esquema de conversão da madeira para carvão vegetal (Brito, 1990).

O processo de carbonização da madeira pode ser subdividido em 5 fases, como mostra a Tabela 2.3. Após a fase III ocorre à redução da quantidade de carvão produzida, entretanto haverá um aumento no conteúdo de carbono fixo.

Tabela 2.3. Fases do processo de carbonização (Doat, e Petrof, 1975).

FASE	Temperatura (°C)	Fenômeno e Produtos
I	Até 200	Sem maiores reações. Redução da umidade da madeira. Fase endotérmica
II	200 a 280	Aumento nas reações de redução. A madeira passa para a cor marrom arroxeada. Fase endotérmica
III	280 a 380	Fase de maior liberação de gases. Composição: mais de 100 compostos químicos diferentes, principalmente: ácido acético, acetona, fenóis, aldeídos, hidrocarbonetos e alcatrões. O produto desta fase já é o carvão vegetal mais ainda com alguns compostos voláteis em sua composição. Fase Exotérmica.
IV	380 a 500	Redução na produção de gases. O carvão vegetal sofre uma purificação em sua composição eliminando o restante dos compostos voláteis contendo oxigênio e hidrogênio, ficando o carbono não volatilizável ou o carbono fixo. Fase Exotérmica
V	Acima de 500	Degradação do carvão. Fim do processo de carbonização e começo da Gaseificação do carvão. Fase Exotérmica.

Os fornos de carbonização podem ser classificados de acordo com a origem do calor necessário para que ocorra o processo. Desta forma, os fornos são classificados em 2 tipos. O primeiro são os que possuem fonte interna de calor por combustão parcial da biomassa

enfernada, então o calor é fornecido mediante a combustão de parte da carga destinada para carbonização. Neste caso, cerca de 10 a 20% do peso da carga de madeira é perdido por combustão total, que produz o calor necessário ao processo. O segundo tipo de sistema é aquele com fonte externa de calor, por queima de combustíveis ou aquecimento elétrico, com vantagem de não ocorrer a queima parcial da insumo (Brito, 1990).

As tecnologias industriais disponíveis para a produção de carvão vegetal possuem rendimentos que variam de 8-36% (Garcia-Perez et al., 2010). Pode-se dizer que o uso de tecnologias de baixo rendimento é responsável por boa parte do desmatamento nos países tropicais, incluindo o Brasil, já que mais madeira acaba sendo necessária para produzir a mesma quantidade de carvão.

É interessante salientar que, geralmente, estes rendimentos não consideram em seus cálculos a quantidade de carbono fixo ou outros parâmetros de qualidade, e é apenas a relação entre a massa sólida carbonácea resultante da carbonização (carvão) e a massa de biomassa utilizada como insumo (como mostra a eq. 2.5), portanto não considera as relações de carbono fixo, como a existente nas equações 2.3 e 2.4.

Deste modo, a matéria volátil em excesso presente no carvão após a carbonização influi neste cálculo de rendimento, mascarando os resultados reais. Assim, a não ser que medidas de qualidade do carvão vegetal e da madeira sejam adotadas, o rendimento pode ser questionável como indicador de uma tecnologia (Antal, 2003; Trossero e Domac, 2008).

$$Re_{\text{carvão}} = \frac{m_{\text{Carvão}}}{m_{\text{Biomassa}}} \quad (2.5)$$

Em que,

RG_{Forno} = Rendimento Gravimétrico do Forno de carbonização

$m_{\text{Carvão}}$ = Massa de carvão ao final do processo

m_{Biomassa} = Insumo de biomassa no início do processo

Tradicionalmente, os reatores utilizados para se atingir os requisitos do processo de carbonização são fornos onde o fornecimento de ar, e consequentemente a temperatura e a taxa de aquecimento são parcialmente controlados. O nível de controle utilizado irá depender do nível tecnológico empregado na produção.

A Tabela 2.4 resume as principais tecnologias utilizadas no país para a produção de carvão vegetal no Brasil. Os fornos de alvenaria, rabo-quente e superfície, são baratos, de fácil construção e operação, e ainda podem ser construídos próximos à floresta. Produzem um carvão de boa qualidade, comparável aos produzidos pelos fornos contínuos (retortas). Os grandes fornos retangulares permitem a instrumentação e a mecanização da carga e descarga, minimizando os custos com mão de obra, e o uso de uma câmara externa de combustão diminui o consumo da madeira, aumentando o rendimento.

Em geral, 60% dos fornos utilizados no país são do tipo rabo-quente; 10% fornos de superfície; e 20% fornos retangulares (Brito, 1990; 2010; Oliveira, 2009; 2012)

O Brasil teve um forno contínuo (retorta) operando, na ACESITA, entre 1986 e 1993 em Turmalina (MG) (Latorre e Cunha, 2006), e hoje a Vallourec Florestal trabalha como uma desde 2008 em Paraopeba (MG). Algumas barreiras impedem que a tecnologia seja adotada em larga escala, como o alto custo de instalação, na ordem de R\$ 3.000,00 a tonelada de carvão por ano (R\$/t.ano) contra R\$ 500,00 dos fornos retangulares, e a necessidade de larga escala de produção, cerca de 25.000 t de carvão por ano (CGEE, 2014).

De acordo com a Almado (2011), os fornos retangulares conseguem diminuir os custos da produção de carvão em até 48% em relação aos pequenos fornos circulares (Figura 2.7).

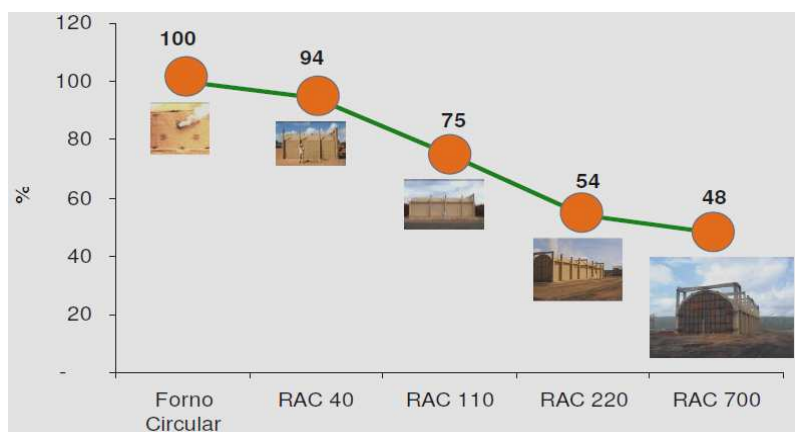
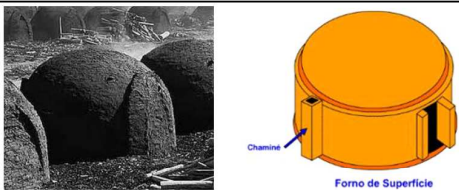
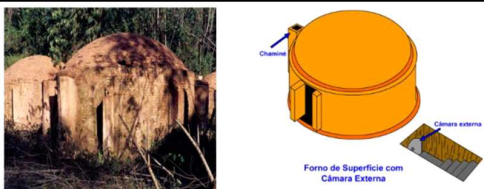
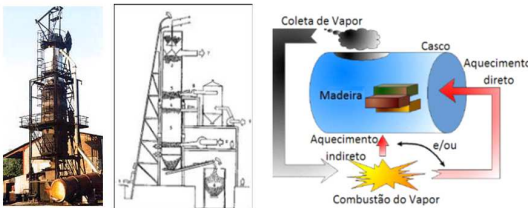


Figura 2.7. Comparação dos custos de produção das tecnologias de carbonização brasileiras (Almado, 2014).

Tabela 2.4. Principais tecnologias utilizadas na produção de carvão vegetal no Brasil (Arruda, 2011; Santos, 2007; Oliveira, 2012)

Modelo	Descrição	Fotos/Esquema
Forno Caieira ou Meda	Mais antigo método. Valas escavadas no chão recoberta com terra. Requer alta mão de obra. Utilizado em áreas pobres, principalmente no estados de Maranhão e Pará. 8 a 12 dias de carbonização.	
Forno Rabo Quente	Modelo de alvenaria mais barato e mais difundido. Difícil controle, com orifícios ao longo da circunferência para entrada de ar (Baianas), requer vigilância contínua na carbonização, difícil mecanização. 7 dias de carbonização	 Aspecto geral de um Forno Rabo Quente
Forno de Encosta	Baixo custo, aproveitamento do desnível naturais dos terrenos. Entrada de ar controlada por orifícios.	 Forno de Encosta
Forno de Superfície	Alvenaria com geometria circular e teto em forma de abóboda com chaminé. Entradas de ar na parte inferior da parede (Tatu). 10-12 dias de ciclo de carbonização (carga, carbonização, resfriamento, descarga).	 Forno de Superfície
Forno de Superfície com câmara externa	Versão do forno de superfície com fonte externa de calor (câmara de combustão), onde são queimados madeira ou resíduos pra fornecer calor para a carbonização. Controle feito através da câmara	 Forno de Superfície com Câmara Externa
Modelo	Descrição	Fotos/Esquema
Forno Retangular	Estrutura de concreto armado em alvenaria, revestido pela mistura de argila, areia e água. Usado em produção de larga escala. Custo elevado, mas permite mecanização e baixa mão de obra.	
Retortas	É a tecnologia industrial de produção de carvão mais moderna. Feitas de material metálico, possibilitam a recuperação de voláteis, possui alto rendimento e qualidade devido a um controle maior do processo. Gases não condensáveis são usados nos aquecedores, combustíveis adicionais são utilizados ocasionalmente. 18 horas de carbonização.)	

Como os fornos de carbonização operam sempre a pressão atmosférica, a influência da pressão nos produtos do processo é pouco comentada. Mas, por experimentos laboratoriais, sabe-se que o aumento da pressão favorece a formação de carvão, devido ao aumento do tempo de residência dos reagentes na zona quente de reação. Sob pressão, os vapores voláteis que se desprende da madeira possuem um volume específico relativamente menor fazendo com que o tempo de permanência ao redor das partículas e no interior das partículas de carvão seja maior, devido ao aumento da pressão parcial do alcatrão ao redor das partículas (Antal, 2003).

2.1.1. Produtos da Carbonização da Madeira

A prática comum da carbonização no Brasil não prevê a utilização dos produtos condensáveis e não condensáveis presentes na fumaça que escapa dos fornos de carbonização. Entretanto, caso sejam utilizados sistemas apropriados para a coleta, pode-se aproveitar estes produtos. O método mais completo e eficiente inclui o aproveitamento do carvão vegetal, dos condensados e também dos gases não condensáveis (Teixeira et al., 2010).

A partir de 1813, no auge da chamada indústria de destilação da madeira, que consistia na pirólise lenta da madeira com aproveitamento de seus subprodutos de valor comercial, o extrato pirolenhoso era utilizado na coloração do linho na Inglaterra. Nos EUA essa indústria teve seu início em 1812 com a coleta e a condensação dos gases produzidos em fornos tipo colmeia. No final do século XIX os fornos tipo colmeia foram substituídos por retortas em grande pátios industriais que operavam em ciclos de 24 horas. Os produtos eram o ácido pirolenhoso cru, carvão e os gases não condensáveis.

O carvão era usado na indústria metalúrgica e para aquecimento. O ácido ou licor pirolenhoso era refinado para fazer ácido acético, metanol e alcatrão. O alcatrão também poderia ser queimado na retorta junto com os gases não condensáveis para suprir energia para o processo e até para secar e pré-aquecer a madeira. Este foi o auge comercial e tecnológico da pirólise lenta da madeira (FAO, 1987). A Tabela 2.5 elenca diversas aplicações comerciais dos produtos da destilação seca da madeira.

Neste trabalho os produtos obtidos dos gases resultantes da carbonização serão divididos em duas fases:

- Gases não condensáveis (GNC) e;
- Extrato pirolenhoso, ou Gás Condensável (GC).

Tabela 2.5. Aplicações comerciais dos produtos da destilação seca da madeira (Brito e Barrichelo, 1981).

Produtos da carbonização	Usos
Carvão	Metalurgia e Siderurgia Carvão Ativado Combustível Indústria carboquímica Agente filtrante e desodorante
Ácido Pirolenhoso Metanol Ácido Acético	Solvente de vernizes e tintas. Síntese de Formaldeído Fabricação de acetatos. Síntese orgânica de corantes produtos farmacêuticos
Alcatrão Gases Combustíveis	Combustível, Dissolvente, Desinfetantes, Produtos farmacêuticos, preservação de madeiras, aromatizantes Combustível, geração de eletricidade

Ao condensado aquoso cru, extraído do gás de carbonização após a condensação dos vapores presentes na corrente mista gás-vapor, são atribuídos diferentes nomes, entre eles: líquido pirolenhoso, extrato pirolenhoso, ácido pirolenhoso, vinagre de madeira, licor pirolenhoso, fumaça líquida e bio-óleo. O termo mais popular é extrato pirolenhoso, e será adotado neste trabalho. Colocando o extrato em repouso por tempo suficiente, o condensado se separa em duas fases distintas, uma contendo o alcatrão insolúvel e a outra mais aquosa contendo os outros componentes químicos, a última é conhecida como ácido pirolenhoso. Deste modo, pode-se dividir o extrato pirolenhoso da seguinte maneira:

Ácido pirolenhoso: parte do extrato pirolenhoso solúvel em água

Alcatrão insolúvel: parte do extrato pirolenhoso insolúvel em água

O ácido pirolenhoso é constituído principalmente de água. É um líquido nocivo, poluente e corrosivo que deve ser trabalhado apropriadamente caso se produza subprodutos para a venda, ou então queimado, o que deve ser feito em conjunto com outro combustível como a madeira ou o gás não condensável em razão de sua alta diluição (FAO, 1987). Entretanto, estudos mostram a eficiência do uso do extrato pirolenhoso na agricultura, como na cultura do arroz, sendo utilizado contra pragas e pássaros e no processo de compostagem e esterilização. Segundo Campos (2007) ele é usado em lavouras há vários anos nas comunidades de carvoeiros. Contudo, é essencial o conhecimento técnico durante a sua aplicação, para evitar concentração excessiva de compostos tóxicos no solo.

O alcatrão insolúvel é um composto heterogêneo de alta viscosidade e com coloração escura, possui um grande número de compostos de elevado peso molecular, os quais são voláteis à temperatura de pirólise e líquidos à temperatura ambiente. Sua composição química é complexa, sendo que a maioria dos seus componentes possui caráter aromático, particularmente o Guaiacol, que é usado como antisséptico e agente de preservação. É usado também na medicina veterinária, para calafetagem na construção de barcos e como pintura para preservar madeira.

No passado, em face do primeiro e segundo choques do petróleo, as grandes siderúrgicas integradas com o carvão vegetal recuperavam parte do alcatrão e do ácido pirolenhoso. O alcatrão era enviado para as siderúrgicas para ser utilizado em substituição do óleo combustível, especialmente no pré-aquecimento de placas de gusa e aço e também em fornos de aquecimento de lingotes (CGEE, 2014). De acordo com Mesa et al., (2003), a fração fenólica do alcatrão pode substituir o fenol petroquímico na formulação de resinas fenólicas em até 50% em massa.

2.1.2 Recuperação e Uso da Fração Líquida da Carbonização.

Quando se deseja utilizar os subprodutos da carbonização é de suma importância conhecer os rendimentos de cada produto oriundo do processo, pois a viabilidade econômica da recuperação do subproduto depende do rendimento de seus componentes mais valiosos, principalmente o ácido acético, mas também a mistura de metanol e acetona que resulta do processo de destilação. Os rendimentos da destilação da madeira estudados por diferentes autores variam consideravelmente, o responsável por esta diferença não é somente o tipo de madeira usado, mas também o tipo de tecnologia, controle, eficiência da condensação, e eficiência de refino.

Diferente do refino de petróleo, que utiliza um insumo que, teoricamente, é 100% vendável, o ácido pirolenhoso é constituído basicamente de água (80 a 95%). Além disso, em razão dos produtos do ácido serem muito corrosivos, a planta deve ser construída de cobre ou preferencialmente aço inoxidável, o que aumenta seus custos. Os produtos são vendidos em competição com os produtos da indústria petroquímica o que torna a concorrência difícil e dependente de contextos locais favoráveis. O lado positivo é que a qualidade do ácido acético é alta e possui um amplo mercado consumidor, entretanto a distância dos consumidores pode

reduzir os lucros. Segundo Baker (1985) a última refinaria que usava os condensáveis da pirólise lenta fechou em 1969.

No Brasil, a recuperação do extrato pirolenhoso está sendo implementada por alguns produtores de carvão, onde o gás é condensado com a passagem dos gases da carbonização em tubos ou chaminés metálicas inclinadas para permitir que o líquido seja drenado para um receptor. O extrato pirolenhoso recuperado é utilizado, principalmente, para produtos de uso agrícola, como por exemplo o biopiról, produzido pela Biocarbo S.A. e indicado como fertilizante orgânico (Biocarbo, 2007).

Apesar destas dificuldades, é provável que o futuro veja novas refinarias de bio-óleo, entretanto, as pesquisas internacionais relacionadas ao tema se concentram no estudo da pirólise rápida, onde o carvão é apenas um subproduto e o bio-óleo produzido tem maior qualidade que o extrato pirolenhoso da carbonização, por isso, podendo ser utilizado para produzir combustíveis ou compostos orgânicos mais valiosos.

Segundo Garcia-Pérez (2012), em geral, hoje existem dois tipos de reatores de pirólise, os de pirólise rápida que produzem bio-óleo e carvão como subproduto e os de pirólise lenta que produzem carvão e calor como subproduto.

2.1.3. Rendimento dos Produtos da Carbonização.

Como já discutido, o rendimento dos produtos da pirólise pode variar de forma significativa e é função principalmente do material a ser pirolisado, da temperatura de pirólise e da taxa de aquecimento. A Figura 2.8 resume os extremos da pirólise onde, em seu centro, seguindo os pontos triangulares azuis entre 350 °C e 750°C, encontra-se a região onde ocorre a carbonização da madeira, quando as frações de sólido, líquido e gás são semelhantes.

De acordo com Brito (1990), há referências de sistemas onde, para cada tonelada de madeira, são obtidos: 308kg de Carvão Vegetal, 100 kg de Alcatrão, 65 kg de Ácido Acético e 25 kg de Metano. Santos (2007) fornece a porcentagem típica dos produtos oriundos da carbonização, conforme mostrado na Tabela 2.6. De acordo com Brito e Barrichelo (1981) a destilação seca da madeira (em laboratório) fornece em média de 15 a 20% de seu peso em gás e seu poder calorífico, a 15°C, é em média igual a 5,4 MJ/m³. Segundo os mesmos autores, a composição química típica é descrita na Tabela 2.7. Na tabela 2.8 compara-se o rendimento de carvão, extrato pirolenhoso e GNC de diferentes espécies de madeira.

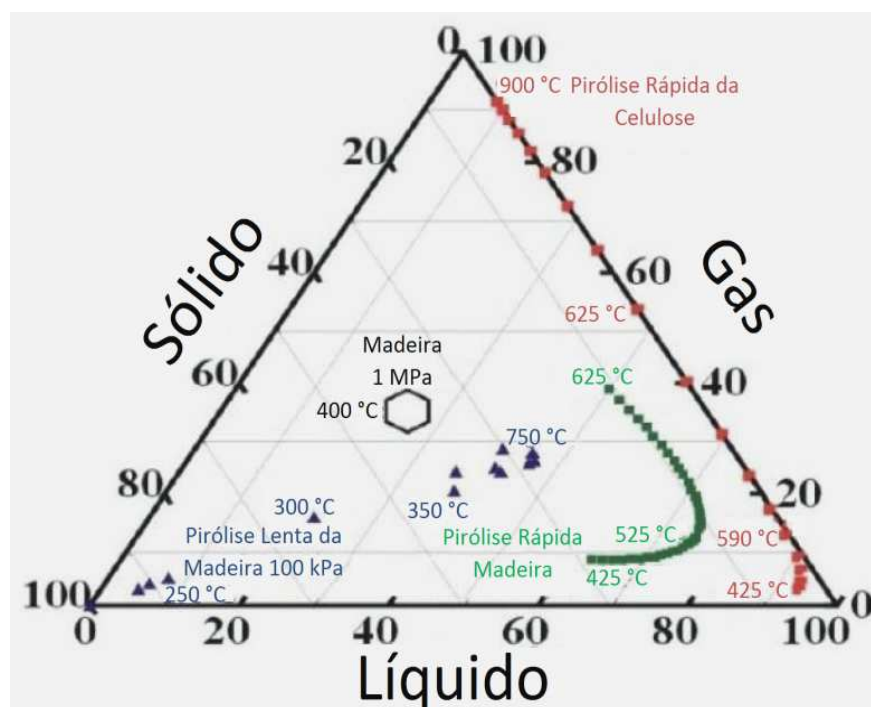


Figura 2.8. Rendimento dos produtos da pirólise em função das condições do processo (Overend, 2004).

Tabela 2.6. Produtos da carbonização (Santos, 2007).

Produtos da carbonização	% - Base seca
Carvão (80% carbono fixo)	33,0
Ácido Pirolenhoso	35,5
(Ácido acético)	5,0
(Metanol)	2,0
(Alcatrão Solúvel)	5,0
(Água e outros)	23,5
Alcatrão Insolúvel	6,5
Gases não condensáveis (GNC)	25,0
Hidrogênio	0,2
CO	8,5
CO ₂	15,5
Metano	0,6
Etano	0,03
Outros	0,2

Santiago e Andrade (2005) carbonizaram a madeira de *Eucalyptus urophylla* em temperaturas máximas de 400°C e 600°C, visando a determinação dos rendimentos gravimétricos dos produtos da carbonização. Como esperado, os maiores rendimentos de GNC para todas as

madeiras estudadas foram obtidos a maior temperatura (600°C), o que pode ser observado na Tabela 2.9.

Tabela 2.7. Composição química média dos produtos gasosos da destilação seca da madeira (Brito e Barrichelo, 1981).

Produto	Porcentagem
Gás carbônico	60
Monóxido de carbono	30
Metano	3
Hidrogênio	3
Vapores de ácido pirolenhoso	1,5
Outros	2,5

Tabela 2.8. Rendimentos para diferentes espécies (Brito e Barrichelo, 1981).

Rendimentos (%)	Madeira da Amazônia	Folhosas Francesas	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>
Carvão	33,7	30,1	30,6	32,4
Pirolenhoso	48,8	53,1	50,1	49,7
Gases não condensáveis	17,7	15,1	17,7	14,7

Tabela 2.9. Valores médios dos rendimentos dos produtos da carbonização, às temperaturas máximas de 400 °C e de 600 °C (Santiago e Andrade, 2005).

Material Carbonizado	Rendimento (%) 400°C			Rendimento (%) 600 °C		
	RGR	RGC	GNC	RGR	RGC	GNC
Lenho de <i>Eucalyptus urophylla</i>	26,91	47,37	25,72	24,3	46,41	28,29
Lascas de <i>Eucalyptus spp</i>	33,85	41,11	25,05	30,32	40,76	28,92
Cascas de <i>Eucalyptus spp</i>	29,89	43,53	26,58	26,58	43,62	29,8
Maravalhas de <i>Eucalyptus spp</i>	30,06	43,09	26,85	26,03	41,55	32,42

RGR: Rendimento gravimétrico em carvão) / RGC: Rendimento gravimétrico em GC / GNC: Rendimento gravimétrico em GNC.

2.2.4. Variação Temporal da Composição dos Gases de Carbonização.

A composição dos gases gerados na carbonização depende da temperatura interna ao longo de suas fases (Tabela 2.3). Até 280°C, desprendem-se os gases oxigenados (CO, CO₂) que irão ceder lugar aos hidrogenados (CH₄) à medida que a temperatura aumenta. O desprendimento de hidrocarbonetos aumenta até 500 °C.

Portanto o poder calorífico do gás tende a aumentar com o avanço da carbonização, como se pode notar na Tabela 2.10, a qual se apresenta a evolução dos produtos majoritários da pirólise em função do período do processo, incluindo a composição dos GNC e o poder calorífico.

Tabela 2.10. Evolução temporal da carbonização (Brito e Barrichello, 1981).

Período de carbonização:	Saída de água	Saída de gases oxigenados	Início da saída de hidrocarbonetos	Fases de hidrocarbonetos CmHn	Dissociação	Fases do hidrogênio
Temperatura (°C)	150-200	200-280	280-380	380-500	500-700	700-900
Conteúdo de Carbono fixo (%)	60	68	78	84	89	91
Gases não-consideráveis (%)						
. CO ₂	68,0	66,5	35,5	31,5	12,2	0,5
. CO	30,0	30,0	20,5	12,3	24,6	9,7
. H ₂	0,0	0,2	6,5	7,5	42,7	80,9
. Hidrocarbonetos	2,0	3,3	37,5	48,7	20,5	8,9
Poder calorífico por m ³ de gás, em calorias	1.100	1.210	3.920	4.780	3.630	3.160
Constituintes condensáveis no gás	vapor d' água	vapor d' água e ácido acético	ácido acético alcohol metílico alcatrão leve	muito alcatrão pesado	alcatrão	pouco condensado
Quantidade de gás	muito pouca	pouca	importante	importante	pouca	muito pouca

Na Tabela 2.10 nota-se que a carbonização tem seu final na fase de hidrocarbonetos (entre 380-500°C), onde se alcança o poder calorífico máximo do processo (4.780 cal/m³ ou 20 MJ/m³). Já na fase inicial, quando ocorre a secagem, tem-se o menor conteúdo energético, (1.100 cal/m³ ou 4,6 MJ/m³), visto que nesta fase o gás apresenta alta concentração de vapor de água e baixa de substâncias combustíveis.

A Figura 2.9 mostra a evolução temporal dos produtos da carbonização durante as fases da pirólise, onde se pode observar que a taxa de água diminui ao longo do processo de carbonização enquanto que as taxas de óleo e GNC (gás) aumentam, produzindo, portanto, um combustível de maior poder calorífico



Figura 2.9. Variação mássica dos produtos da carbonização durante as fases da pirólise (Biocarbo, 2007).

2.2. A Indústria de Carbonização no Brasil.

Em 2010, a produção mundial de carvão vegetal foi de 1000 PJ (~24 milhões de tep), sendo que os principais países produtores são listados na Tabela 2.11. O Brasil é o único que produz carvão vegetal em larga escala para ser utilizado na indústria, destacando-se, então, como maior produtor e consumidor de carvão vegetal. O consumo do produto está concentrado no mercado interno, e tem como principais setores consumidores os de ferro-gusa e aço, com 70,2%, o de ferro-liga, com 11%, seguido do residencial, com 12,1%, do industrial (excluindo-se a siderurgia), com 3,8%, no qual destaca-se o setor de cimento e comercial. Estima-se que no Brasil, aproximadamente, um terço da produção de ferro-gusa e mais da metade da produção de ferro-liga utilizam carvão vegetal como termorredutor (BEN, 2015; Carneiro et al., 2012b).

Tabela 2.11. Produção de carvão vegetal no Mundo em 2010 (Kuparinen et al., 2014)

País	Produção [PJ]	Participação Global
Brasil	139	14%
Nigéria	87	9%
Etiópia	82	8%
Índia	63	6%
Congo	45	5%
China	38	4%
Tanzânia	35	4%
Gana	35	4%
Egito	30	3%
Tailândia	30	3%
Madagascar	26	3%
Zâmbia	23	2%
Colômbia	23	2%
Sudão	23	2%
Somália	21	2%
Outros Países	291	29%
Total	991	100%

O uso de carvão vegetal na indústria moderna de minério de ferro tem sua origem no século XVI, onde era utilizado em fundições artesanais para produzir ferramentas. Foi a partir de 1921 que se iniciou o desenvolvimento da produção brasileira de ferro-gusa, com a instalação de diversos altos-fornos. Em 1936 fabricavam-se no país cerca de oitenta mil toneladas do produto. Hoje o estado com maior destaque neste cenário é o de Minas Gerais, com uma das mais importantes indústrias de produção de ferro-gusa do mundo, sendo também o principal estado produtor de carvão vegetal. É um exemplo único no mundo de articulação de extração e verticalização do minério de ferro, onde estão disponíveis todas as ferramentas e elementos fundamentais à sua transformação como grandes jazidas localizadas na região central do estado (Arruda, 2005; Oliveira, 2009).

No Brasil, a madeira utilizada para a produção de carvão tem duas origens principais, as florestas nativas, e as florestas plantadas. Os plantios para produção de carvão com fins siderúrgicos começaram no país de maneira intensiva em 1937, mas apenas a partir de 1960, graças ao programa de incentivo fiscal ao florestamento e reflorestamento, ocorreu um expressivo aumento das áreas de florestas plantadas (Carneiro et al., 2012b).

O *Eucalyptus ssp.* é a principal espécie utilizada nos plantios energéticos de carvão. Esta espécie tem grande importância para a indústria brasileira, pois é matéria-prima para a produção de celulose, carvão, e madeira para a construção, móveis, postes, etc. Esta espécie é

caracterizada pelo rápido crescimento em ciclo de curta rotação, alta produtividade florestal e capacidade de se adaptar a diversas condições ambientais.

Em 2014, a área de eucaliptos no Brasil chegou a 5,56 milhões de hectares, com maior concentração, respectivamente, em Minas Gerais, São Paulo, Bahia e Mato Grosso do Sul. Sendo que cerca de 15% da produção de eucaliptos foi destinada a produção de carvão (IBA, 2015; Ferreira, 2012), porém, segundo as estatísticas do BEN (2015), do total de lenha produzida no Brasil, 31% foram transformados em carvão vegetal. De acordo com Piketty et al., (2009), o país possui 77 milhões de hectares de terras potencialmente disponíveis para alimentar uma cadeia de fornecimento de carvão para a indústria siderúrgica. Hoje a produtividade média de um plantio de eucalipto no Brasil é de 40 a 50 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ (AMS, 2012).

Todavia, esta capacidade produtiva ainda não consegue suprir a demanda oriunda da indústria de carvão vegetal. Estima-se que 55,0% da produção brasileira de carvão vegetal provém de florestas nativas, realizada por pequenos e médios produtores. Entretanto, a tendência atual é a de que o uso de florestas plantadas substitua o de florestas nativas, devido a pressões econômicas e políticas para a preservação dos recursos naturais (Carneiro et al., 2012b; ABRAF, 2012). Em uma estimativa mais recente, porém, este valor seria de 16% já em 2014, segundo a IBA (2015).

O efeito da crise econômica mundial de 2008 no mercado de carvão vegetal foi a queda de mais de 50% em seu preço, de novembro de 2008 a maio de 2009 o preço médio era de R\$ 65,00/MDC, enquanto, no período anterior à crise, chegou a ser R\$ 210,00/MDC. Apesar da recuperação iniciada em 2010, a siderurgia no Brasil ainda não se recuperou da crise financeira. A China e os países asiáticos reduziram as compras do ferro gusa Brasileiro, substituído pelo ferro-gusa oriundo da Rússia e Ucrânia, e os americanos ainda compram volumes reduzidos em relação aos anos anteriores da crise. Fatores que refletem de maneira negativa no mercado nacional de carvão vegetal. Segundo a ABRAF (2012), em 2012 as usinas produtoras de ferro gusa ainda operavam com apenas 42,9% da capacidade instalada, (Carneiro et al., 2012b). Dados preliminares recentes do BEN (2016) mostram que a produção de carvão caiu 38% de 2008 a 2015. A Figura 2.10 mostra a evolução da produção de carvão vegetal no Brasil desde 1970.

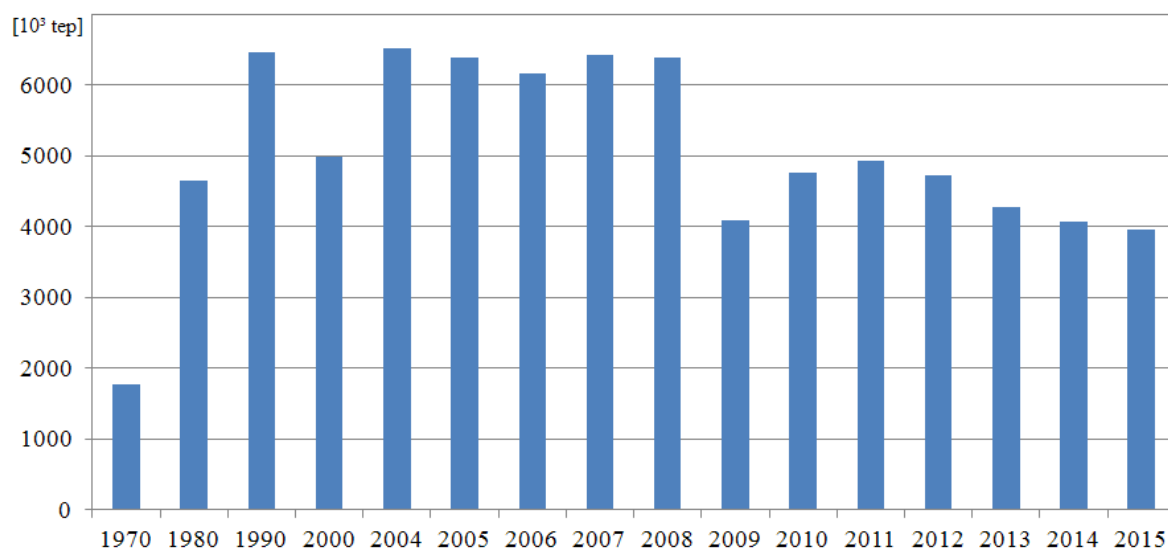


Figura 2.10. Produção de carvão vegetal no Brasil de 1970 a 2015 (BEN, 2015; BEN, 2016)

Apesar deste cenário negativo, durante a crise o consumo de carvão vegetal de florestas apresentou um comportamento diferente. Ocorreu um crescimento de 61,4% (entre 2009 e 2012), o que mostra a força das exigências dos grandes consumidores nacionais e internacionais de ferro gusa para redução do uso das áreas nativas, aliado às exigências ambientais nacionais. Isto pode ser observado na Figura 2.11 (ABRAF,2013; Oliveira, 2012).

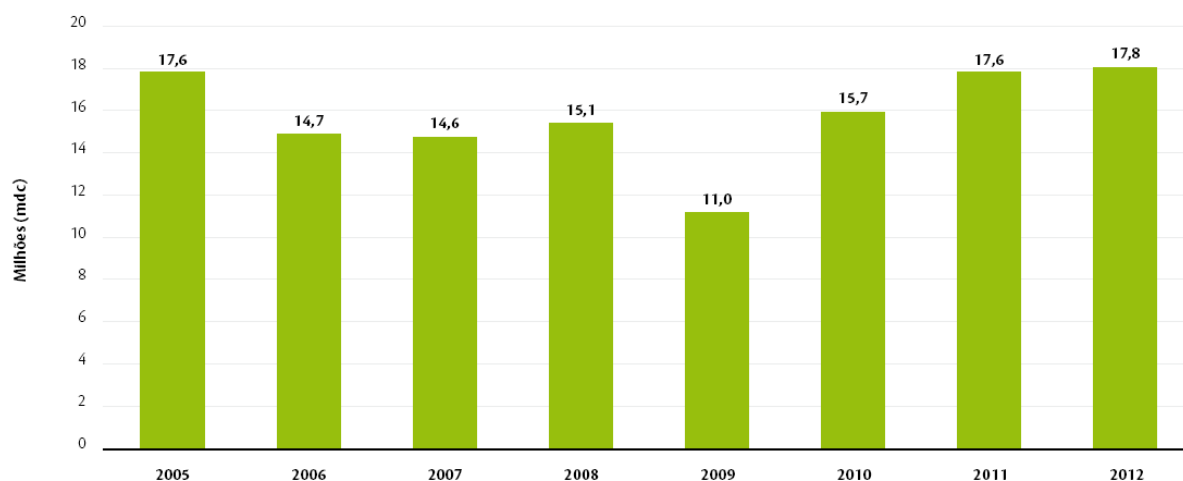


Figura 2.11. Consumo nacional de Carvão vegetal de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013).

A atividade carvoeira no Brasil possui quatro características negativas marcantes, a devastação de florestas nativas, más condições de trabalho, a poluição gerada pelos processos de produção e o baixo nível tecnológico.

Em contrapartida, deve-se salientar que o carvão vegetal produzido de maneira sustentável é uma rota renovável para a produção de ferro gusa e pode contribuir para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), já que o ciclo natural do carbono nas florestas evita emissões líquidas de CO₂ na atmosfera ao substituir o coque que tem carbono de origem fóssil. Este fato coloca a siderurgia brasileira em vantagem competitiva no que se refere às emissões de GEE. Estima-se que a produção de aço mundial, predominantemente baseada na utilização de coque de carvão mineral, gera cerca de 11% das emissões globais de CO₂ antropogênico anualmente (Shimaoka et al., 2016). Em média, cerca de 2,2 t de CO₂ é emitido para cada t de aço bruto produzido no mundo (IPCC, 2014).

Apesar deste aspecto positivo, os sistemas de produção de carvão ainda são ineficientes, o que gera maior pressão sobre as florestas nativas, e poluidores por não recuperarem ou controlarem os gases da carbonização.

No Brasil, inexistem políticas públicas específicas para o controle ambiental da poluição na produção de carvão e estímulo ao emprego de tecnologias mais eficientes e ambientalmente adequadas. Segundo Carneiro et al. (2012b), o setor produtivo tem resistência ao aperfeiçoamento das tecnologias em razão dos custos associados às mudanças na infraestrutura das UCs. Fatores combinados que acabam por limitar a modernização da indústria de carvão vegetal no país.

Os poluentes da carbonização são materiais particulados e COVs (Compostos Orgânicos Voláteis). Os particulados compreendem cinzas, partículas de carvão e fuligem que são arrastadas pelas gotículas de alcatrão durante a carbonização. Dentre os COVs destaca-se o CH₄, um gás de efeito estufa e tem potencial de aquecimento global (GWP) 25 vezes maior que o gás carbônico, e o monóxido de carbono que pode ser tóxico em concentrações acima de 400 ppm. Os COVs são os principais compostos poluentes presentes na fumaça, principalmente na fração pesada que contém alcatrão.

A toxicidade destes gases já foi identificada por algumas pesquisas, onde se descobriu que a maioria dos grupos tóxicos pertence ao grupo dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e dos compostos orgânicos nitrogenados, os quais apresentam atividade mutagênica e cancerígena, sendo que 14 destes estão inclusos na lista de poluentes prioritários da agência de proteção ambiental americana (USEPA) (Barcellos, 2002).

Sabe-se que o gás da carbonização possui substâncias combustíveis e, em uma combustão completa, as emissões seriam constituídas apenas de CO₂, vapor de água e particulados não queimados. Portanto, o processo de combustão desses gases é uma alternativa para controlar a

poluição gerada, fornecendo ainda calor suficiente para a secagem da lenha, para geração de energia ou para reduzir a necessidade de madeira em 25% a 30% para obtenção da mesma quantidade de carvão, motivo pelo qual as empresas do setor estão interessadas no desenvolvimento de tecnologias capazes de queimar eficientemente estes gases (Carneiro et al., 2012b). Os queimadores de gases da carbonização serão discutidos em item a parte a seguir (Item 3.2).

2.3. Produção de Carvão Vegetal em Fornos Retangulares

Para aumentar a produtividade e reduzir custos, hoje as maiores empresas do setor investem no desenvolvimento de fornos de grande capacidade volumétrica com até 700 st (estéreos²) de madeira, com carregamento e descarregamento mecanizados e controle da carbonização feito por pirômetros ou termopares (CGEE, 2014).

Estes fornos são construídos em formatos retangulares, por isso, são geralmente denominados como fornos retangulares. Possuem estrutura de concreto e fechamento em alvenaria com tijolo comum, revestidos com uma massa produzida a partir da mistura de areia, argila e água, e são equipados com duas grandes portas metálicas. Fornos mais modernos podem ser construídos por tijolos refratários e revestidos por massas especiais para o aumento da durabilidade.

A tecnologia tem como base os antigos fornos do tipo Missouri, muito utilizados nos EUA no início do século XX, e foi implantada para se atingir ganhos em mecanização e aumento da escala por reator. A Figura 2.12 mostra um exemplo de fornos retangulares em operação de carga mecanizada.

² Estéreo ou metro-estere: unidade de volume, comumente utilizada na medição de lenhas, representado o volume aparente de madeira contido em uma pilha de lenha de 1 m³.



Figura 2.12. Exemplo de um Forno Retangular com carregamento mecânico (Almado, 2014; Santos, 2007).

O controle da carbonização é realizado por entradas de ar na parede e/ou abaixo dos fornos (chamados de tatus), ou por câmaras de combustão externa (quando existentes). Estas câmaras são equipamentos de alvenaria acoplados aos fornos e interligados por canais, pelos quais os gases aquecidos circulam promovendo a transformação da madeira (Carneiro et al., 2012b).

O comprimento padrão do forno retangular irá variar de acordo com sua capacidade. Hoje se encontram em operação fornos capazes de produzir 200 toneladas mês de carvão. A Figura 2.13 compara o aumento da capacidade produtiva dos fornos ao longo do tempo.

Os Fornos retangulares representam uma evolução da produção de carvão vegetal. Este forno começou a ser operado na década de 90, com capacidades de 40 m³ denominado RAC 40 (R = Retangular, AC = Acesita, Capacidade = 40m³), e permitiu iniciar o processo de mecanização durante a maior parte da fase de carregamento e de descarregamento. No final dos anos 90 a capacidade passou para 110 m³ (RAC 110) e possibilitou mecanizar 100% do processo de carregamento da madeira e a descarga do carvão. Depois, o RAC 220 que inovou ao possuir duas portas metálicas e mais recentemente o RAC 700 (Oliveira, 2009). A Figura 2.14 apresenta a evolução dos fornos retangulares de alvenaria.

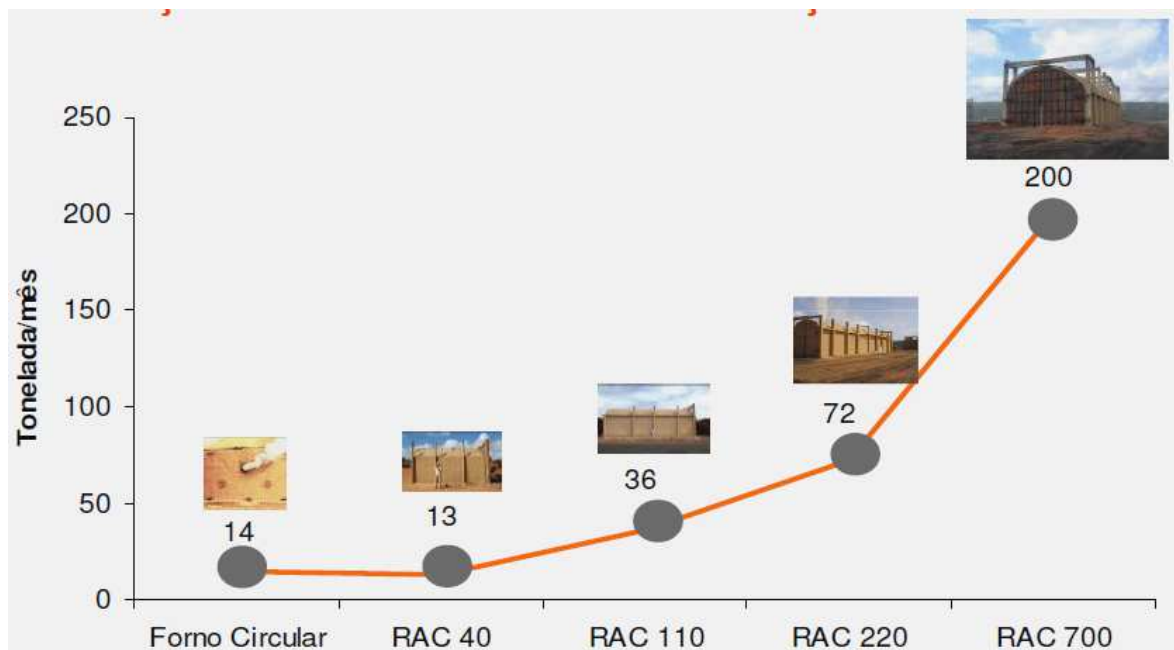


Figura 2.13. Evolução da capacidade produtiva dos Fornos Retangulares (Almado, 2014)



Figura 2.14. RAC 40, 110, 220 e 700. (Carrier, 2014)

Os fornos retangulares da UC Itacambira da Plantar Siderúrgica possuem dimensões de 26,0 m x 4,0 m x 4,2 m, com 220 m³ de capacidade. O ciclo completo de carbonização (carregamento, ignição, carbonização, resfriamento do leito de carvão e descarga), tem

duração média de 12-18 dias, sendo quatro a seis dias para carbonizar a madeira e de dez a doze dias para o resfriamento.

O rendimento dos fornos varia de 30 a 35%, sendo que a UC possui 120 fornos com monitoramento da temperatura interna das unidades, o que permite um melhor controle sobre o processo. A Figura 2.15 exibe um forno localizado na UC Itacambira.



Figura 2.15. Forno retangular utilizado para produção de carvão vegetal da Plantar Energética em Itacambira (MG).

O controle de temperatura representa uma evolução na carbonização brasileira. Normalmente, o controle do processo era realizado de maneira subjetiva, manualmente, com base na experiência dos operadores, que se fundamentam na coloração da fumaça e a temperatura na parede do forno (medida através do tato). O monitoramento térmico permite a leitura da temperatura em vários pontos utilizando termopares ou monitores infravermelhos, que podem identificar a necessidade de correções devido a desvios no processo de produção em tempo real, como rachaduras nas paredes (que tende a aumentar excessivamente a temperatura), possibilitando a diminuição de falhas operacionais e levando a um aumento de produtividade (Arruda, 2005; Oliveira, 2009; Oliveira, 2012). As empresas têm investido continuamente em tecnologias, visando o aumento do controle do processo, como, por exemplo, a aplicação de trocadores de calor para a redução do tempo de resfriamento (Brito, 2010).

Devido às suas grandes dimensões, a carbonização não ocorre de maneira uniforme no interior de um forno retangular. Cada pedaço de madeira pode se encontrar em uma etapa diferente do processo (Tabela 2.3) dependendo de sua posição dentro do reator, gerando o que se chama de frente de carbonização, uma linha imaginária que representa um setor uniforme de madeira na mesma fase da pirólise que se desloca no interior do equipamento até que a carbonização esteja completa.

2.4. Análise do Ciclo de Vida (ACV)

A ACV é uma ferramenta ambiental utilizada no estudo e avaliação dos impactos ambientais gerados no ciclo de vida de um produto ou serviço. O ciclo de vida compreende, desde a aquisição de matérias primas até processamento, uso e disposição final (ISO, 2006a). A ISO 14044 (2006) define o termo produto como qualquer bem ou serviço tangível ou intangível.

Normalmente, os impactos ambientais são associados essencialmente à produção industrial, como fontes pontuais de diferentes emissões, como ocorre, por exemplo nos licenciamentos ambientais de empreendimentos. Na ACV, o problema ambiental é associado ao produto, com as consequências de sua existência sendo avaliadas do “Berço ao Tumulo” (Sundqvist, 1999).

Quando um problema é analisado pela lógica da ACV, a responsabilidade dos aspectos ambientais³ fica associada à necessidade do produto, ou seja, a sua função. O cumprimento de determinada função por um bem ou serviço compreende a extração de recursos bióticos e abióticos escassos, emissões ao ambiente, e na necessidade de outros produtos com seus próprios ciclos de vida e aspectos ambientais, e assim sucessivamente, portanto, o enfoque da ferramenta está justamente na função do produto em questão, o que significa que ela pode ser usada para comparar bens e serviços diferentes que, porém, realizam a mesma função.

A ACV possibilita o tratamento de questões ambientais, como o gerenciamento de recursos naturais, respondendo qual produto consome mais ou menos determinada fonte natural, ou qual pode ser classificado como mais renovável, com base em valores diretos de consumo no ciclo de vida. Outras funções são a definição de parâmetros ambientais para rotulagem, e otimização de processos com base em ganhos ambientais significativos, como no design ecológico (ou *ecodesign*), que podem se basear na ACV para, por exemplo, substituir materiais não recicláveis por recicláveis, desde que tenham a mesma função em um determinado produto e que signifiquem uma redução em seu impacto de ciclo de vida.

Existem duas normas ISO aplicadas a ACV, as quais são usadas como guia para execução deste trabalho:

³ Correntes de matéria e de energia ou emissões atmosféricas, efluentes líquidos, resíduos sólidos e emissões não materiais (como radiação e ruídos) que entram ou saem do sistema de produto (Ribeiro, 2009).

- ISO 14.040: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework* (ISO, 2006a): Define os termos principais e determina os princípios gerais relacionados as etapas da ACV, que são: definição de objetivo e escopo; análise do inventário, avaliação de impactos; e interpretação.
- ISO 14.044: *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines* (ISO, 2006b): explicita os requisitos e as diretrizes para os estudos de ACV para as quatro etapas da ferramenta.

As duas normas brasileiras publicadas pela ABNT, em vigor, que dispõem sobre ACV, são as seguintes:

- ABNT NBR ISO 14040:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.
- ABNT NBR ISO 14044:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

A Figura 2.16 apresenta graficamente as fases da ACV segundo as normas ISO.

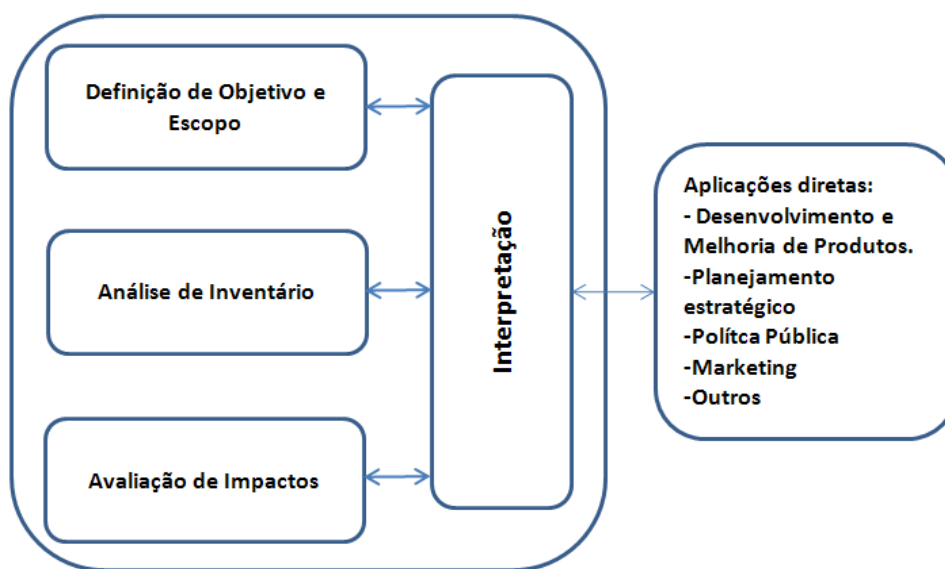


Figura 2.16. Fases da ACV (ISO, 2006a)

É importante salientar que a técnica da ACV possui limitações, não relacionadas a sua concepção científica, mas sim na capacidade dos cientistas em compreender e modelar

sistemas produtivos. Segundo as normas ISO, estas limitações são, principalmente, a subjetividade nas escolhas dos executores e as limitações acerca das informações obtidas.

Um vez que se toma uma decisão subjetiva, se enfraquece o método, pois, enquanto um executante adota uma decisão que considera a melhor, outro pode optar por outra, gerando pontos de incertezas metodológicas. Para aumentar a confiabilidade da pesquisa, é sempre recomendável proceder a uma verificação de Sensibilidade e verificação de Consistência de dados e resultados (ISO, 2006a).

2.4.1. Definição do Objetivo e do Escopo

Esta é a primeira fase da ACV, sendo o ponto de partida das diretrizes do estudo e definição das próximas etapas.

Os objetivos devem ser declarados sem ambiguidades, e os seguintes pontos devem ser esclarecidos: a aplicação pretendida; as razões para conduzir o estudo; o público ao qual os resultados se destinam; e se os resultados serão usados em análises comparativas declaradas ao público. Segundo a mesma norma, resumidamente, o escopo do estudo deve descrever os itens: função; unidade funcional; fluxo de referência; limites do sistema; procedimentos de alocação; Metodologia de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV); interpretação a ser utilizada; pressupostos; escolha de valores e elementos opcionais; limitações; requisitos de qualidade dos dados; tipo de revisão crítica, se aplicável; tipo de formato de relatório.

De modo geral, o estudo deve ser claro, em relação a valores utilizados e demais considerações e limitações, sendo que a ligação destes com os resultados deve ser explícita. Isto para impedir que possíveis subjetividades possam levar a resultados tendenciosos.

2.4.2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

O ICV consiste na coleta e listagem dos dados de consumo e emissões de cada sistema de produto. Nele são realizados balanços de massa e energia, onde definem-se entradas e saídas de materiais ou produtos. Dado a importância do inventário, suas limitações refletirão em todo o trabalho. Das etapas que constituem a ACV, o ICV é o mais dispendioso em termos de tempo e de recursos financeiros (Ribeiro, 2009).

O inventário deve ser caracterizado por vários elementos, como por exemplo, o ano de coleta de dados, representatividade tecnológica e geográfica e sua precisão. Dessa forma, a exatidão

das informações determina diretamente o grau de certeza e confiança dos resultados. As limitações do estudo estão diretamente ligadas à capacidade de se computar um inventário fiel à realidade do que se pretende estudar. Portanto, a qualidade dos dados deve ser colocada de forma explícita.

2.4.3. Avaliação do impacto do Ciclo de Vida (AICV)

O propósito da AICV é auxiliar a compreensão dos resultados do ICV. Existem dois tipos de estudos: Estudos de ACV e estudos de ICV. Estudos de ICV são simplesmente estudos de ACV sem a parte de AICV (ISO, 2006a). Na AICV os dados do inventário são processados de modo a torná-los compreensíveis ao público alvo do estudo.

Normalmente, a AICV usa os dados do ICV e os divide em categorias de Impacto ambiental. Por exemplo, as emissões de gases que causam aquecimento global são vinculados a categoria de impacto: aquecimento global. Já o consumo de combustíveis fósseis é ligado à categoria depleção de recursos abióticos. A AICV dá o entendimento e a avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto.

Os dados de inventário são então correlacionados com indicadores de categoria de impacto ambiental, baseados em métodos de cálculo científicos. Por exemplo, para a categoria de impacto aquecimento global, geralmente, utiliza-se a metodologia de cálculo do IPCC, sendo o indicador o kg de CO₂ equivalente.

Deste modo, para cada categoria de impacto escolhida é selecionado um indicador, sendo os dados do inventário caracterizados para este indicador através de uma metodologia científica. A reunião dos resultados dos indicadores provê a informação sobre os problemas ambientais associados ao ciclo e vida do produto, porém limitada as categorias selecionadas (Pennington *et al.*, 2004). Um fluxograma exemplificando a metodologia de execução da AICV é mostrado na Figura 2.17.

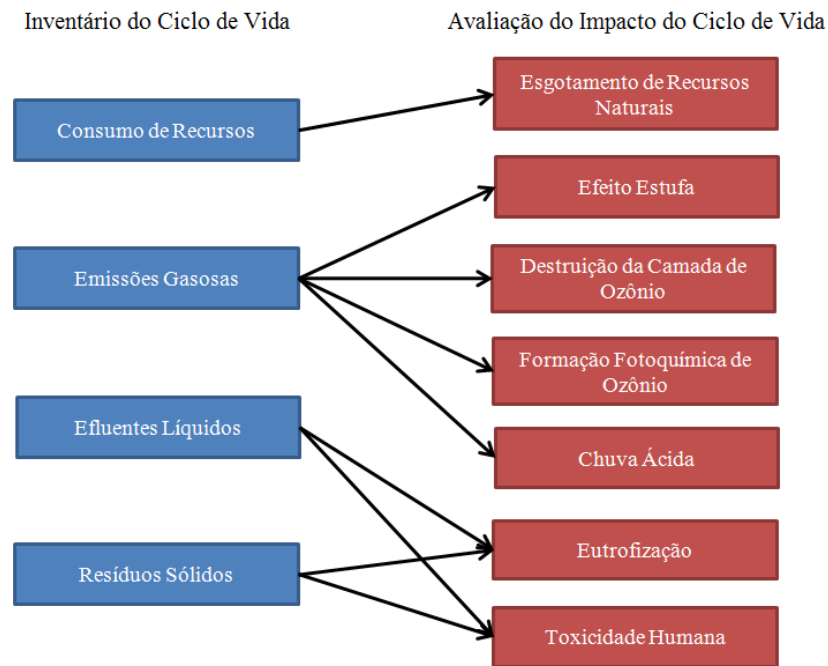


Figura 2.17. Exemplo representativo da metodologia de AICV (Adaptado de Silva, 2006c)

A ISO 14040 prevê três elementos mandatórios dentro desta etapa: a seleção de categorias de impacto, a classificação, e caracterização. Além destes, existem elementos opcionais, que são a normalização, o agrupamento e a ponderação.

A seguir apresenta-se uma explicação dos elementos que constituem a AICV (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

Seleção: seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização. As categorias representam tipos importantes de impactos ambientais associadas a impactos locais, como eutrofização ou eco toxicidade, ou globais como redução da camada de ozônio e uso de recursos fósseis. Esta etapa deve estar diretamente ligada ao objetivo do estudo.

Classificação: esta etapa correlaciona os dados do as categorias de impacto selecionadas. Um dados de emissão pode estar ligado a uma ou mais categorias. Por exemplo, óxidos de enxofre causam toxicidade humana e chuva ácida.

Caracterização: envolve o método científico utilizado para converter o dado do inventário no indicador de cada categoria e a agregação dos resultados dentro de cada uma delas. Por

exemplo, para o metano, normalmente utiliza-se um fator de caracterização uma a 25 vezes o potencial de aquecimento global do gás carbônico com um tempo de vida de 100 anos na atmosfera.

Normalização: esta é uma etapa opcional na ACV, onde os resultados dos indicadores são relacionados a uma situação espacial e temporal de referência, oferecendo um resultado de magnitude e significância relativa àquela referência. Por exemplo, sabendo as quantidades de emissões de poluentes que são despejadas em um rio anualmente, em termos dos indicadores selecionados, pode-se avaliar a importância que um determinado empreendimento terá em relação ao aumento destes indicadores neste rio gerados pelo empreendimento.

Agrupamento: trata-se da agregação dos resultados normalizados em uma ou mais categorias, utilizada normalmente para dar uma significância mais simplificada aos resultados.

Ponderação: esta etapa pode ser usada para converter os indicadores de categorias por meio de fatores de ponderação, pautados em valores de importância dados pela equipe que realiza o estudo. Por exemplo, pode-se decidir que categorias relacionadas a toxicidade aquática tem pouca significância em locais onde não há corpos aquáticos na abrangência dos impactos.

Cada método de AICV é baseado em princípios e medições diferentes e, portanto, possuem fatores de caracterização, normalização e ponderação particulares. A escolha do método aplicado ao estudo irá depender do caso analisado e do tipo de análise que se pretende realizar, ou seja, à escolha deve estar diretamente ligada ao objetivo do estudo.

A estrutura típica da avaliação de impactos, considera dois tipos de resultados, intermediários e finais na corrente de causa e efeito, ou seja entre a emissão do poluente (e.g. SO₂) e seu efeito na natureza (e.g. morte de florestas). Para minimizar incertezas acerca dos resultados, existem as categorias de impacto chamadas de “*midpoint*”, ou intermediárias, na qual se avalia apenas o potencial de impacto, restringindo-se as etapas iniciais da modelagem da corrente de causa e efeito, por exemplo, no caso do SO₂, mede-se a quantidade de substâncias ácidas emitidas e não o número de espécies florestais impactadas. Já as categorias do tipo “*endpoint*”, ou orientadas a danos, tenta-se modelar a corrente completa de causa e efeito, portanto, o número de indivíduos atingidos pelo poluente.

Quando um sistema de produto tem mais do que uma saída ou função útil, os encargos ambientais associados ao processo devem ser repartidos entre os coprodutos ou múltiplas funções, este procedimento é chamado de alocação. A ISO recomenda que as fronteiras do sistema sejam expandidas, de forma a envolver os subprodutos, e assim evitar uma possível alocação. Se isso não for possível, pode-se realizar este procedimento de três formas: econômica, energética ou mássica. Ou seja, no caso da alocação econômica, o produto com maior valor econômico terá alocado a maior parte dos aspectos ambientais.

Outra abordagem comum nas ACVs é chamada de substituição, a qual envolve a identificação de produtos externos que podem ser diretamente substituídos pelos coprodutos do sistema estudado, o que também é uma forma válida e comum de se evitar um indesejável procedimento de alocação de coprodutos que não são o foco principal do sistema em análise. Este procedimento gera o chamado produto evitado, e é frequente em análises de sistemas de reciclagem e de recuperação de energia quando esta é de alguma forma desperdiçada. Por exemplo, quando se recicla o alumínio ou o plástico e estes são reenviados ao mercado e evita-se a mineração e os processamentos industriais relacionados a produção de um novo produto semelhante, assim os aspectos ambientais relacionados a estes processos são negativados do sistema de produtos onde ocorre a reciclagem. A substituição é geralmente reconhecida como um método válido no âmbito da ACV e seu uso é sancionado por um número de padrões de ACV, tais como o PAS 2050 (BSI, 2011), usada para medir a pegada de carbono de produtos, do WBCSD/WRI (WBCSD/WRI, 2016) e ainda em documentos como o manual do ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*) (ILCD, 2016) (Brander e Wylie, 2011).

2.4.4. Interpretação dos resultados e avaliação de melhorias

A interpretação consiste na verificação dos resultados pautados pelo objetivo do estudo, visando estabelecer conclusões, recomendações e possíveis melhorias acerca do trabalho realizado, desenvolvendo um processo iterativo de análise. A norma ISO 14044 (ISO, 2006a) recomendada que a interpretação dos resultados da ACV contenha a identificação dos itens mais significativos, baseado nos resultados, e avaliações de integridade, sensibilidade e consistência.

2.5. Tecnologias de conversão energética

Neste item, é realizada uma descrição das tecnologias que serão consideradas no estudo. Embora existam muitas tecnologias que podem ser apropriadas para o aproveitamento dos gases residuais da carbonização, serão consideradas apenas a Turbina a Gás de Queima Externa (ou em inglês *Externally Fired Gas Turbine* (EFGT), o Ciclo Rankine convencional e o Ciclo Rankine Orgânico (ou em inglês *Organic Rankine Cycle* (ORC)). Estas opções foram selecionadas considerando o estado atual das tecnologias, sua adequação aos gases da carbonização e seu crescente uso em aplicações com energias renováveis. Também, outras tecnologias bastante utilizadas como os motores a combustão interna, turbinas a gás de queima direta não podem ser facilmente adaptadas ao uso do gases da carbonização (Miranda et al., 2013).

2.5.1. EFGT

A turbina a gás de queima externa tem sido estudada desde meados do século XX, devido a sua capacidade de aproveitar combustíveis “sujos”, que contem, por exemplo, alcatrão e particulados, não adequados às turbinas de queima direta, no início sendo estudada principalmente para o uso do carvão e depois e em usinas nucleares onde a tecnologia é empregada nos reatores a gás de alta temperatura. Seu desenvolvimento no uso de fontes alternativas se deu em razão da indisponibilidade de combustíveis de maior qualidade, chamados limpos. Porém, com o aumento da disponibilidade destes combustíveis, em razão da melhoria nos processos de refino do petróleo, e do aumento na disponibilidade do gás natural, seu uso e desenvolvimento perderam força no decorrer dos anos (Al-Attab e Zainal, 2015).

Contudo, seguindo a tendência de aumento do uso de fontes renováveis, seu conceito tem ganhado força, graças a sua capacidade de utilizar uma grande variedade de combustíveis em comparação às turbinas de queima direta. Hoje a tecnologia tem sido utilizada em pequenas escalas (<1 MWe) até grandes plantas em geração centralizada, com a faixa de potência variando de 1 a 30 MWe (Keirstead e Shah, 2013), entretanto, já existem plantas piloto como a desenvolvida pela EVO e a GHH na Alemanha com 50 MWe, que utiliza gás de alto forno como fonte de energia principal (Al-Attab e Zainal, 2015). Empresas como a americana Mackay Green (Mackay Green, 2016) prometem potências de 1,8 a 11 MW, ou potências

superiores sob demanda, entretanto, ainda existem poucas empresas no mercado capazes de disponibilizar a tecnologia.

As EFGTs possuem três vantagens que as tornam especialmente atrativas quando o objetivo é a utilização dos gases de carbonização. Primeiro, ela permite a utilização de um gás “sujo” e de baixo poder calorífico como fonte de energia e, em segundo lugar, não requerem a utilização de água para rejeição de calor do ciclo, dois pontos essenciais para o aproveitamento dos gases da carbonização. Por último, o ciclo permite que o calor residual da turbina (gases de exaustão) possa ser aproveitando como ar de combustão na câmara de combustão, proporcionando o que se chama de ciclo regenerativo, que, em tese, pode aumentar sua eficiência em comparação ao ciclo aberto convencional, já que uma fração do calor antes rejeitado poderá ser reincorporado ao ciclo termodinâmico.

Além disso, os gases de exaustão da turbina podem ter um interessante potencial se utilizados para a secagem da madeira utilizada no processo de carbonização, o que pode ser avaliado em estudos futuros.

A turbina a gás convencional, de queima direta, tem sido usada na geração termelétrica ou também como motor no setor aeronáutico. Ela foi teorizada pelo físico britânico James Prescott Joule no ano de 1840 e desenvolvida na prática por George Brayton, em 1872. O esquema básico do ciclo é mostrado na Figura 2.18.

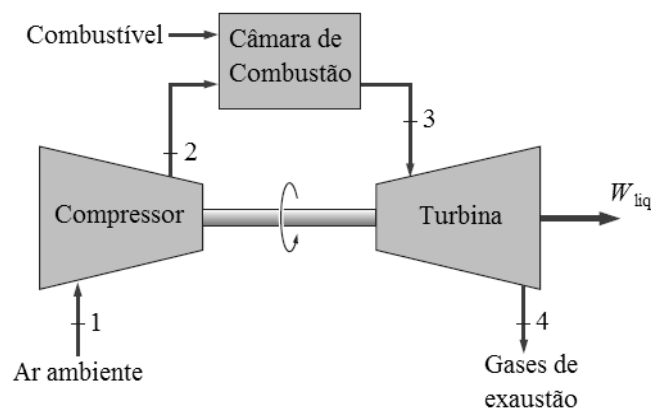


Figura 2.18. Esquema de uma central baseada em turbina a gás de queima direta com ciclo aberto

Os componentes do ciclo são um compressor, uma câmara de combustão e uma turbina que transforma a energia dos gases em trabalho mecânico. As turbinas a gás geralmente operam em um ciclo aberto, como mostrado na Figura 2.18. Nele, ar em condições ambientes é

encaminhado ao compressor, onde ocorre o aumento de sua pressão e temperatura. O ar pressurizado é levado à câmara de combustão, onde o combustível é queimado a pressão constante. Os gases quentes resultantes da combustão entram na turbina e se expandem até a pressão ambiente, produzindo trabalho. Se os gases que saem da turbina são exauridos ao ambiente e não recirculam, o ciclo é chamado de aberto, caso contrário são chamados de fechado. Parte do trabalho desenvolvido pela turbina (W_t) é consumido para acionar o compressor (W_{comp}), o restante pode ser utilizado para geração de eletricidade, para mover um veículo ou outros propósitos. O ciclo fechado, que é menos comum, é mostrado na Figura 2.19.

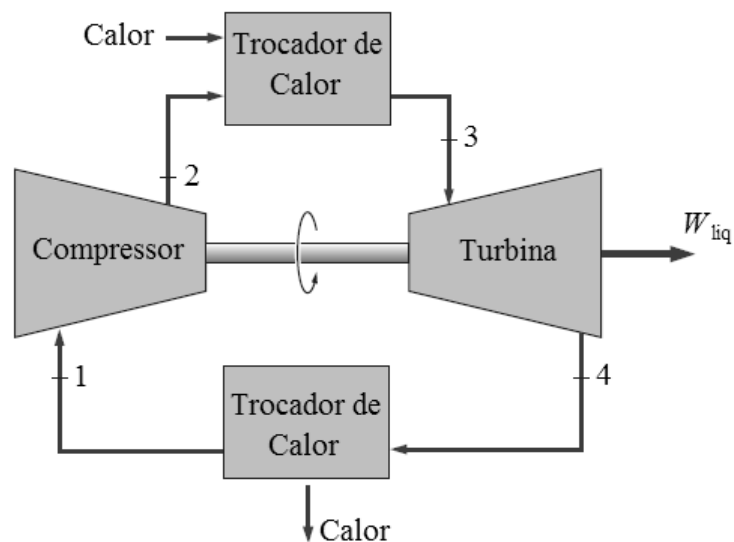


Figura 2.19. Esquema de uma central baseada em turbina a gás de queima direita com ciclo fechado

Quando se deseja obter informações preliminares sobre o ciclo, o fluido de trabalho pode ser modelado como apenas ar, utilizando a hipótese do ar padrão, evitando-se assim as complexidades de mudanças de composição durante a combustão. Neste caso, em um ciclo aberto, a câmara de combustão é substituída por um trocador de calor que promove o mesmo aumento de entalpia que seria obtido com a combustão. O ciclo Brayton no diagrama $T \times s$ é mostrado na Figura 2.20.

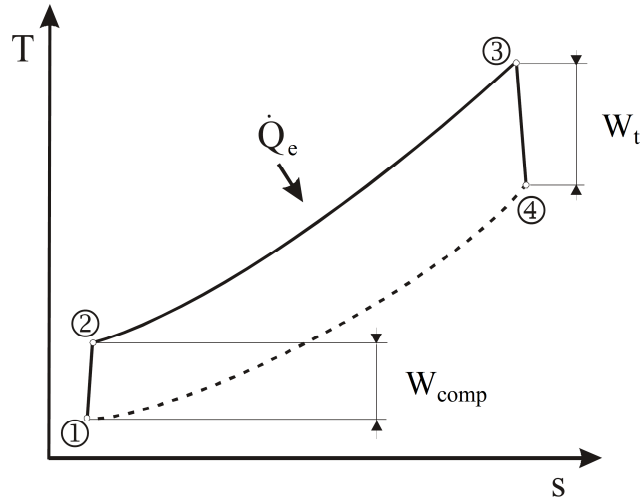


Figura 2.20. Ciclo da turbina a gás de queima direita

O ciclo é dividido em três partes: a primeira consiste na compressão do ar que ocorre no compressor. O processo pode ser modelado como uma compressão isentrópica, entretanto, no processo real existem perdas. Estas perdas são quantificadas usando a eficiência isentrópica do compressor η_{comp} , que é a relação entre a variação de entalpia entre entrada e saída do compressor considerando-se um processo de compressão isentrópico e a variação de entalpia para o processo real (equação 2.6).

$$\eta_{\text{is,comp}} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (2.6)$$

Depois da compressão segue um processo de aquecimento do ar no trocador de calor à pressão constante. O próximo processo é a expansão na turbina que, de maneira teórica assim como no compressor, pode ser modelada como isentrópica, sendo a relação importante a eficiência isentrópica da turbina $\eta_{\text{is,t}}$, que é usada para quantificar suas perdas (equação 2.7).

$$\eta_{\text{is,t}} = \frac{T_3 - T_4}{T_{3s} - T_4} \quad (2.7)$$

A eficiência do ciclo pode ser calculada usando-se a Eq. 2.8.

$$\eta = \frac{\eta_{is,t} (T_3 - T_{4,is}) - \frac{1}{\eta_{is,comp}} (T_{2,is} - T_1)}{T_3 - T_2} \quad (2.8)$$

Nas Eq. 2.6 a 2.8, as eficiências isentrópicas descrevem unicamente as perdas termodinâmicas relacionadas à variação da energia térmica para a mecânica nos componentes do ciclo aos quais dizem respeito, relacionadas a um processo real não adiabático e com atrito. Outras perdas resultantes de imperfeições dos outros processos, como as perdas no trocador de calor, vazamentos ou perdas por atrito nos rolamentos são negligenciadas.

Quando se deseja converter a energia da biomassa em eletricidade através de turbinas a gás convencionais ocorrem problemas que acabam por inviabilizar tal ideia. Primeiro, quando se emprega biomassa, os gases provenientes de sua combustão possuem particulados e outros contaminantes que danificam as palhetas da turbina. Para evitar isto, é necessária a instalação de um sistema de limpeza (filtros cerâmicos, ciclones, etc.) que normalmente tornam o sistema economicamente inviável. Outro problema é que quando se utilizam gases de reduzido poder calorífico, faz-se necessária uma vazão de combustível elevada, o que leva a necessidade da modificação do projeto da câmara de combustão e da entrada na turbina. Além disso, devido a maior vazão de combustível, gasta-se mais energia para comprimir o combustível e perde-se eficiência (Datta et al., 2009).

Já a queima externa permite o uso de gases com particulados e outras impurezas, pois os gases da combustão não passam pela turbina, sendo o fluido de trabalho apenas ar. Um esquema simplificado de uma EFGT com ciclo regenerativo é mostrado na Figura 2.21. O sistema é composto de várias partes. A compressão acontece no compressor, como na turbina a gás de queima direta, mas depois disso, o ar é aquecido em um trocador de calor em vez de numa câmara de combustão. Posteriormente o ar é igualmente expandido na turbina. O ar expandido que sai da turbina pode ser usado na queima do combustível na fornalha, sendo os gases resultantes da combustão usados para aquecer o ar que sai do compressor no trocador de calor. O ciclo termodinâmico é mostrado de maneira esquemática num diagrama T x s na Figura 2.22.

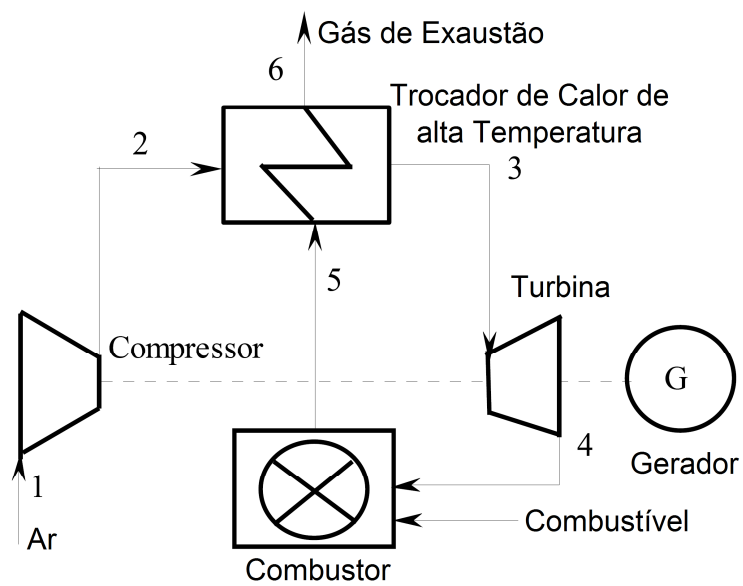


Figura 2.21. Esquema de uma central baseada em EFGT com ciclo recuperativo (Zheshu e Turan, 2010)

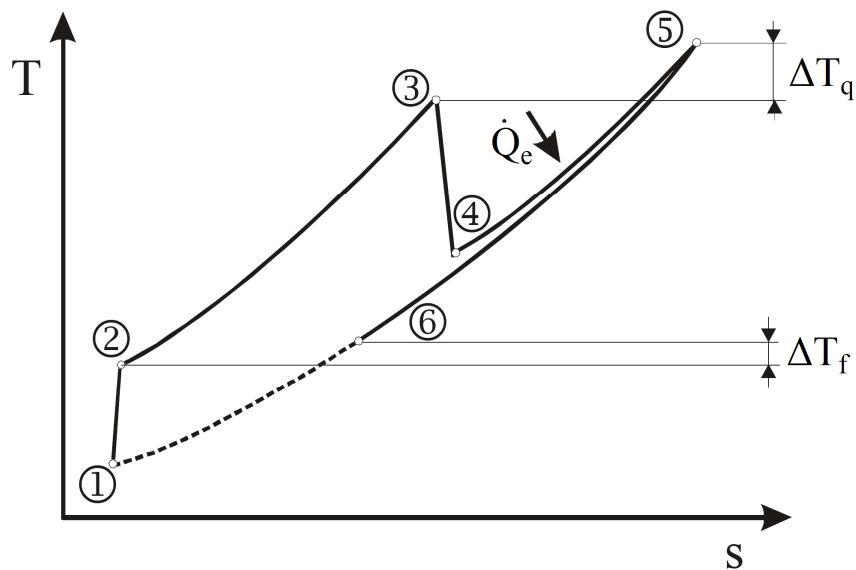


Figura 2.22. Ciclo de EFGT (Kautz e Hansen 2007)

Na Figura 2.22 o processo 2-3 é o aquecimento do ar do comprimido no trocador de calor, o processo 4-5 é a combustão e o processo 5-6 é o resfriamento dos gases de escape no trocador de calor. Q_e denota o calor que é adicionado ao ciclo pelo processo de queima no combustor. A diferença de temperatura no trocador de calor quente e fria (ΔT_q e ΔT_f , respectivamente) é

um parâmetro importante para a otimização do equipamento e, em geral, uma pequena diferença de temperatura melhora a utilização do calor e a eficiência, porém, aumenta o tamanho do trocador de calor e seus custos.

A troca de calor depende das diferenças de temperatura entre o ar que sai do compressor, que é função da razão de pressão, e dos gases da combustão. Uma razão de pressão maior leva a um aumento de temperatura na saída do compressor, e conseqüentemente a troca se torna menos eficiente já que a temperatura dos gases de combustão é normalmente limitada pelo material empregado no equipamento

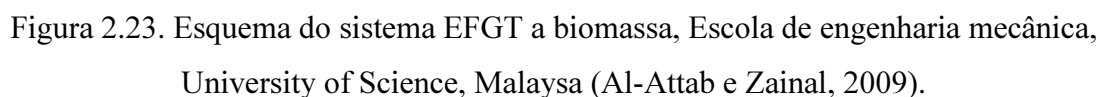
A vantagem do sistema está no processo recuperativo 5-6, onde a energia dos gases quentes que saem da turbina é reaproveitada no ciclo, aumentando sua eficiência. Esta eficiência pode ser calculada usando-se a Eq. 2.9, considerando apenas as perdas relacionadas aos processos não isentrópicos na turbina e no compressor. Devido ao aquecimento do ar de combustão, menos combustível é requerido e melhora-se a eficiência térmica do sistema.

$$\eta_{\text{EFGT}} = \frac{\eta_{\text{is,t}} (T_3 - T_{4,\text{is}}) - \frac{1}{\eta_{\text{is,comp}}} (T_{2,\text{is}} - T_1)}{T_5 - T_4} \quad (2.9)$$

A maioria dos componentes da EFGT são comuns e podem ser facilmente encontrados no mercado, entretanto há dois componentes que não: o trocador de calor de alta temperatura e o combustor (Fornalha). Um esquema de uma EFGT é mostrado na Figura 2.23.

A combustão da biomassa na EFGT pode ser realizada, por exemplo, de duas maneiras:

- a) A biomassa sólida é queimada diretamente no combustor. Neste caso é necessário o emprego de um ciclone para remover os particulados que podem causar uma redução da eficiência no trocador de calor.
- b) Outra opção é empregar gás de síntese gerado pela gaseificação da biomassa. Desta maneira o gás pode ser queimado em um combustor comum. Da mesma forma, isso pode ser realizado para o gás de pirólise, com queimadores apropriados para seu uso.



The diagram illustrates a biomass gasification process. Biomass is fed into a gasifier (G). The gasifier produces gas (6) and tar (4). The gas (6) passes through a heat exchanger (HE) and a cyclone (C) before exiting as exhaust gas (Gás de Exaustão). The tar (4) is collected in a trap (T). The gas (6) also passes through a cyclone (C) before exiting as exhaust gas (Gás de Exaustão). The gas (6) also passes through a cyclone (C) before exiting as exhaust gas (Gás de Exaustão).

53

O componente característico e, mais importante de uma EFGT, é o trocador de calor de alta temperatura. A baixa eficiência do ciclo ocorre principalmente devido as limitações e perdas neste equipamento. A existência de particulados, cinzas e alcatrão circulantes pelo trocador de calor são os parâmetros que mais determinam o tipo de trocador a ser empregado, pois, uma pequena fração de alcatrão pode obstruir as passagens do trocador. Os trocadores de calor de placas são muito eficientes, tendo uma grande área de troca de calor num volume reduzido, mas as passagens são estreitas e podem ser obstruídas pelo alcatrão. Neste caso é geralmente indicado o uso de um trocador do tipo casca e tubo, mostrado na Figura 2.25, com passagens mais largas e limpeza mais simples, onde é comumente recomendado que o fluido com maior tendência a entupimento corra no tubo, onde há maior velocidade e superfície mais lisa. (Guyer, 1999; Al-Attab e Zainal, 2009).

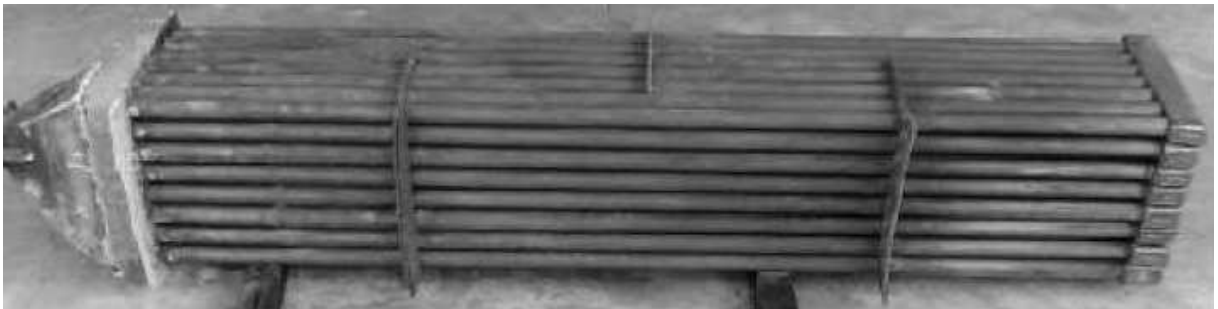


Figura 2.25. Trocador de calor de casco e tubo de aço inox (Al-Attab e Zainal, 2009).

A eficiência do ciclo dependerá principalmente no desenho deste trocador de alta temperatura. Quanto maior a temperatura que o trocador seja capaz de suportar, maior será a eficiência da unidade EFGT. Para atingir este objetivo é necessário o desenvolvimento de novos materiais.

A temperatura de entrada na turbina está na faixa de 700-1000°C se for usada superliga baseada em níquel no trocador de calor, até 1100°C se for usada à tecnologia de dispersão de oxido e até 1300°C se for com materiais cerâmicos (as duas últimas se encontram em estágio de desenvolvimento). Entretanto, altas temperaturas de entrada na turbina também irão requer o uso de turbinas avançadas, como as que utilizam resfriamento nos estágios iniciais e uso de revestimentos especiais, e consequentemente mais caras que as convencionais.

Um estudo paramétrico do desempenho da tecnologia EFGT é mostrado na Figura 2.26, onde são comparados a eficiência do ciclo com a temperatura dos gases na saída do combustor, ou seja, na entrada do trocador de alta temperatura. Fica claro que a temperatura de saída do

combustor, que tem relação com a temperatura de entrada na turbina, possui uma grande influência na eficiência do ciclo.

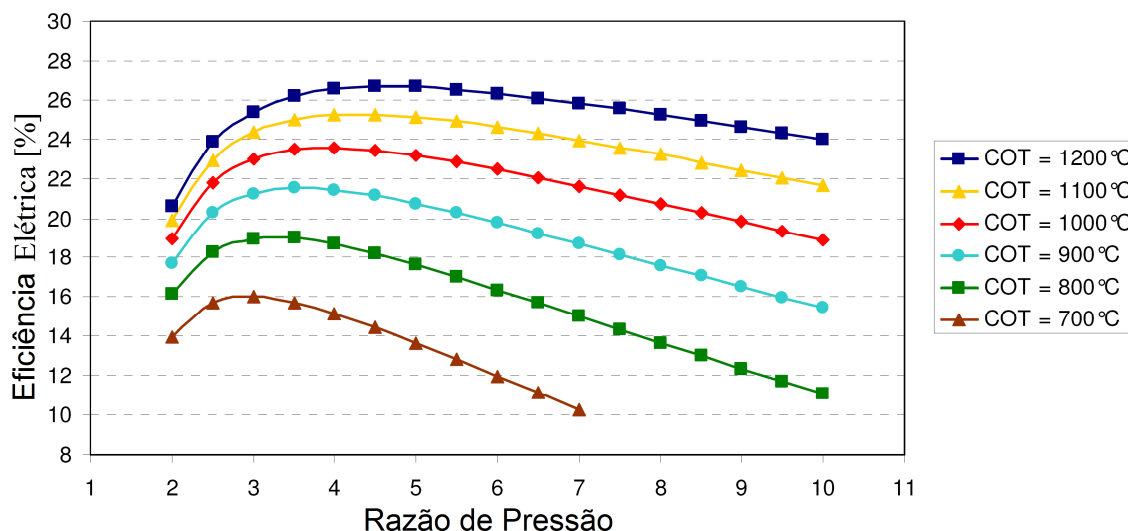


Figura 2.26. Eficiência elétrica pela relação de pressão e com a temperatura de saída dos gases do combustor (COT) (Carrara, 2010).

Hoje, existe no Brasil uma planta experimental que utilizava os gases da carbonização para produzir eletricidade através de uma EFGT. O projeto está localizado em Martinho Campos (MG), e é resultado de uma parceria entre a Arcelor Mittal BioFlorestas e a Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais), com o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento denominado “Tecnologias integradas de transporte de gás de carbonização de biomassa e beneficiamento de subprodutos para cogeração de energia elétrica com microturbinas”.

O sistema conta com 12 fornos retangulares AM320, com capacidade de 225 m³ de madeira cada, conectados por dutos de aço aéreos, como mostra a Figura 2.27, o qual é sincronizado para garantir que três fornos sempre estejam em período de carbonização, um no início, um no meio e o último no final do processo.



Figura 2.27. Sistema de condução de gases no projeto EFGT - Arcelor/Cemig.

O sistema de transporte de gases foi desenvolvido para pré-aquecer a fumaça dos fornos através da troca de calor com os gases quentes que saem do queimador. Para tanto, o sistema é composto por 2 dutos, um interno e outro externo, com os gases quentes fluindo no espaço anular entre os dois dutos. O sistema é capaz de aquecer os gases até um limite máximo, para evitar que entrem em combustão antes de chegar ao queimador. Segundo a empresa, incrustações de alcatrão não foram encontradas, característica que o mantém limpo e garante a integridade das válvulas e do controle operacional.

O queimador de gases tem um volume bastante reduzido quando comparado ao utilizados por outras empresas do setor e será discutido no item 3.2, que trata sobre os queimadores de gases de carbonização. A Figura 2.28 mostra a EFGT utilizada no sistema e a Figura 2.29 o trocador de calor de alta temperatura utilizados no projeto.



Figura 2.28. EFGT instalada na UPE Buriti no projeto Arcelor/Cemig.



Figura 2.29. Trocador de calor da EFGT instalado na UPE Buriti no projeto Arcelor/Cemig.

Os gases saem do queimador a uma temperatura de aproximadamente 850 a 980 °C, porém, são resfriados para entre 850°C e 900 °C para não exceder o limite ideal de temperatura no trocador de calor de alta temperatura, o qual aquece o ar atmosférico comprimido que entra na turbina. Quando os gases na entrada da turbina atingem 650 °C ela é capaz de produzir entre 18 e 20 kWe, e a 850°C entre 50 e 55 kWe, entretanto, a turbina tem uma potência nominal de 100 kW, podendo gerar até 80 kWe líquidos nas condições próximas aos padrões ISO (15°C, 1.013 bar e 60% de umidade). O equipamento foi vendido pela empresa italiana Genera (Genera, 2016), sendo a turbina de manufatura da Turbec (Turbec, 2016) chamada de T100.

A potência gerada pelo sistema apresentou uma variação, associada à mudança de temperatura do ar que entra na turbina, uma vez que a energia provida pelos gases de carbonização não é homogênea. Como já discutido sobre as EFGTs, existe uma correlação positiva entre a potência gerada e a temperatura de entrada do ar quente na turbina. A temperatura média de entrada na turbina foi de 683°C, variando entre 572°C e 728°C, sendo a relação entre a energia máxima produzida e a média de menos 17% (Castro, 2014).

2.5.2. Ciclo Rankine a Vapor

Nomeado em honra ao professor e engenheiro Escocês William John Macquorn Rankine (1820-1872), o ciclo Rankine é amplamente utilizado em máquinas térmicas para converter calor em eletricidade. Nele, o calor é fornecido externamente a um ciclo fechado, usualmente

pela combustão ou pela fissão nuclear. Um esquema simplificado de uma instalação do tipo é apresentado na Figura 2.30. A energia da queima do combustível é usada para evaporar a água pressurizada por uma bomba, o vapor gerado, por sua vez, aciona uma turbina e produz trabalho. O vapor é então condensado e encaminhado novamente para a bomba.

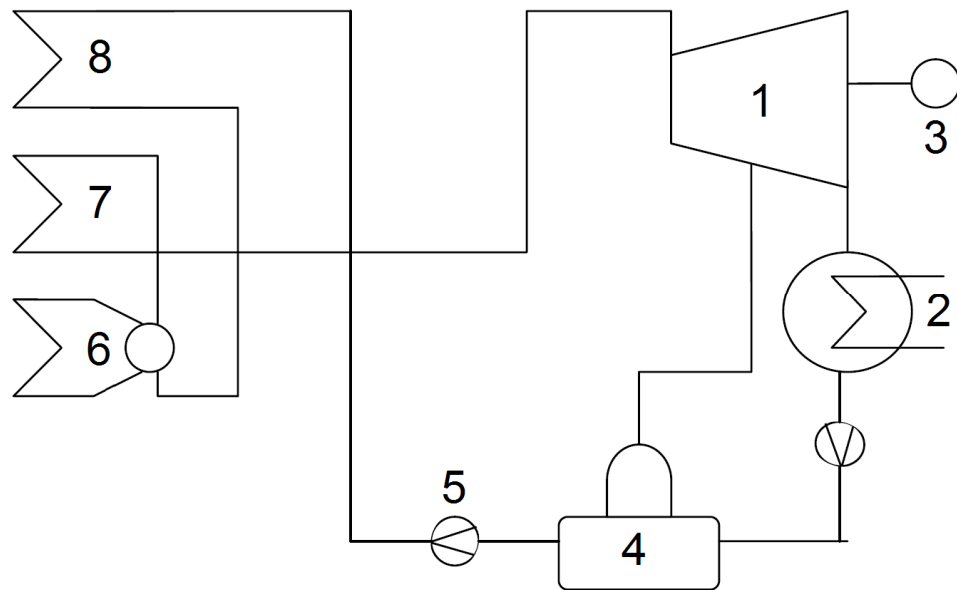


Figura 2.30. Esquema simplificado de uma instalação de potência a vapor

Os principais componentes da planta de potência são: a turbina a vapor (1), condensador (2), gerador (3), desareador (4), bomba de água de alimentação (5), evaporador (6), supraaquecedor (7), e economizador (8). Geralmente as plantas de potência a biomassa são baseadas neste ciclo utilizam o supraaquecimento do vapor para aumentar sua temperatura acima do ponto de saturação da água antes de entrar na turbina.

As características básicas do ciclo de geração de potência a vapor são as seguintes:

- O fluido de trabalho é a água.
- Os combustíveis utilizados em uma instalação com turbina a vapor podem ser sólidos, líquidos ou gasosos.
- Bom custo específico de investimento (\$/kW instalado);
- Tecnologia comprovada e disponível comercialmente;

A eficiência de uma instalação que utiliza turbina a vapor varia de menos de 20 a até 45%, porém, quando utilizado em pequena escala e baixos parâmetros de vapor este número pode ser menor. Uma desvantagem está exatamente em sua aplicação em pequenas escalas, onde apresenta falta de opções comerciais, além da necessidade de uma fonte de água para dissipar o calor de baixa temperatura no condensador, o ar também pode ser empregado, porém com decréscimo na eficiência (Lora e Nascimento, 2004). O diagrama $T \times s$ de um ciclo de Rankine é mostrado na Figura 2.31.

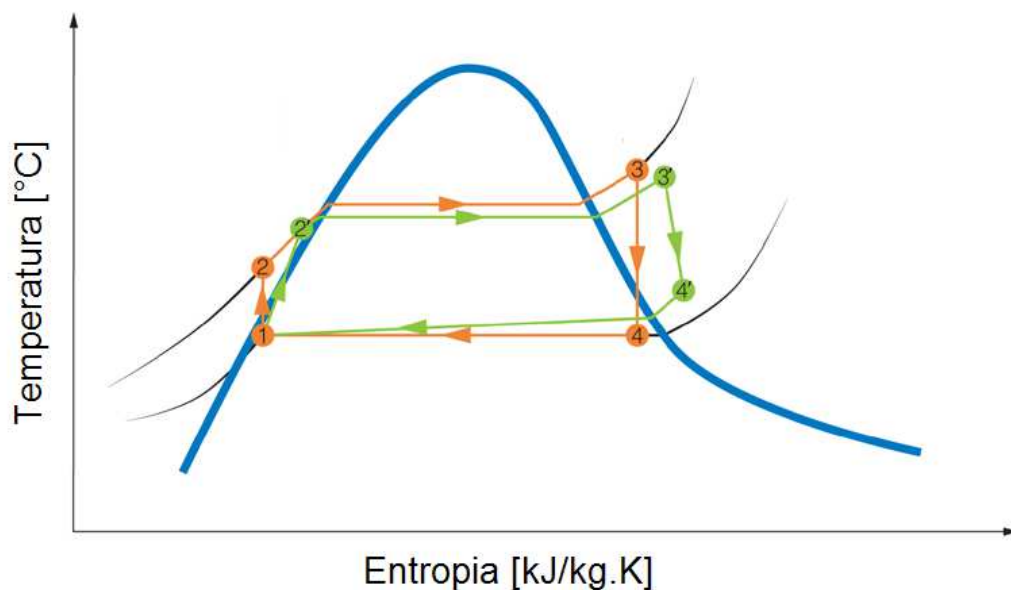


Figura 2.31. Ciclo Rankine básico.

Seguindo a Figura 2.31, observa-se que os processos do ciclo a vapor ideal são:

- Processo 1-2. Compressão isentrópica do fluido de trabalho na bomba.
- Processo 2-3. Transferência de calor do gás da combustão para o fluido de trabalho à pressão constante na caldeira.
- Processo 3-4. Expansão isentrópica do fluido de trabalho na turbina.
- Processo 4-1. Transferência de calor do fluido de trabalho para vizinhança no condensador à pressão constante.

Os quatro componentes básicos associados ao ciclo Rankine ideal são dispositivos em fluxo contínuo. As mudanças de energia cinética e potencial da água são pequenas frente aos fluxos

de calor e de trabalho e são, portanto, negligenciadas. A análise de energia dos quatro componentes são dadas a seguir (Eq. 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 e 2.14):

Para a turbina:

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \quad (2.10)$$

Para o condensador:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{cond}}}{\dot{m}} = h_3 - h_2 \quad (2.11)$$

Para a bomba:

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = h_3 - h_4 \quad (2.12)$$

Para a caldeira:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad (2.13)$$

A eficiência de 1º lei do é calculada pela razão entre o *output* de energia e o total de calor adicionado. Para o ciclo, a eficiência é determinada por:

$$\eta = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_b}{\dot{Q}_{\text{Ad}}} = h_3 - h_4 \quad (2.14)$$

Onde:

η = eficiência do ciclo [%]

$\dot{m}$ = vazão do fluido de trabalho [kg/s]

$\dot{W}_t$ = trabalho realizado pela turbina [kW]

$\dot{W}_b$ = trabalho consumido pela bomba [kW]

$\dot{Q}$ = fluxo de calor adicionado ao ciclo [kW]

O ciclo Rankine real (representado pela linha verde na Figura 2.31 – 1'-2'-3'-4'), entretanto, apresenta irreversibilidades relacionadas a cada estágio do ciclo, sendo as fontes mais comuns às fricções dos movimentos fluido-mecânicos, por exemplo, na bomba e na turbina, e pela perda de calor ao ambiente. Em particular, a eficiência da turbina a vapor é limitada pela formação de partículas de água na saída da turbina, que podem causar a erosão de suas palhetas, diminuindo sua vida útil, um dos motivos pelo qual o superaquecimento é geralmente empregado, capaz de produzir um fluido mais seco depois da expansão. Ciclos com extração e reaquecimento também aumentam a eficiência do ciclo, ao reaquecer o vapor parcialmente expandido na turbina e possibilitar a expansão de baixa pressão no equipamento, porém estas modificações requerem uma análise de custo/benefício.

Hoje o ciclo Rankine a vapor é o ciclo de potência mais comum e provê aproximadamente 85% da eletricidade consumida no mundo. Ao longo das últimas décadas diversas melhorias foram implementadas para aumentar sua eficiência, como a recuperação da energia dos gases de exaustão, melhorias na combustão, secagem dos combustíveis, redução no consumo dos equipamentos auxiliares, turbinas mais eficientes, reaquecimento, aumento da temperatura e pressão do ciclo e incremento das temperaturas máximas e mínimas médias. Hoje uma planta a carvão supercrítica pode atingir uma eficiência de 45% (com base no PCI do combustível). Porém, sua eficiência é limitada pela eficiência de Carnot e pela segunda lei da termodinâmica e, dado o atual estágio da tecnologia, qualquer novo aumento substancial na eficiência será difícil e com custos elevados (Zhu, 2015).

Devido a algumas características o ciclo Rankine a vapor não é uma opção atrativa em pequenas escalas (< 2 MWe). Isto ocorre, principalmente, em razão da baixa eficiência das turbinas nesta escala, seu alto custo específico, especialmente para as de multiestágio. Também, como o ciclo requer altas temperaturas e pressões, o que aumenta sua complexidade, é raro encontrar equipamentos em baixa escala e é geralmente inviável a contratação de mão de obra especializada para operar uma pequena central, já que usinas em baixa escala geralmente não podem pagar operadores locais especializados e requerem equipamentos simples e manufatura menos complexa (Quoilin, 2011).

2.5.3. ORC

O Ciclo Rankine Orgânico (ORC) foi colocado em prática pela primeira vez no ano 1961 pelos engenheiros israelenses Harry Zvi Tabor e Lucien Bronicki. A tecnologia é similar à

tecnologia do ciclo Rankine convencional, com a diferença de que o fluido de trabalho não é a água, mas sim um fluido orgânico.

No início de seu desenvolvimento a tecnologia foi empregada para o aproveitamento de fontes de energia geotérmicas, devido a sua capacidade de utilizar-se de fontes de calor de baixa temperatura. Depois, passou a ser utilizada para o aproveitamento de calor residual de indústrias ou mesmo outras máquinas térmicas, tais como, turbinas a gás, ou motores de combustão interna. Não obstante, ocorreram significativos desenvolvimentos em seu uso com biomassa, principalmente na faixa de 200 a 2000 kWe, faixa de potência com baixas opções comerciais onde o ORC já se encontrava estabelecido comercialmente (Obernberger e Gerold, 2004).

No ORC, a vaporização ocorre a uma temperatura menor do que um ciclo a vapor convencional. Um esquema de uma central ORC é mostrado na Figura 2.32. A maioria dos componentes de um ciclo de Rankine orgânico são os mesmos que o do ciclo de Rankine convencional, mas existem algumas diferenças. A mais importante é a regeneração, que pode ou não estar presente. Em um sistema regenerativo, o vapor que sai da turbina, estando ainda superaquecido, pode ser aproveitado para aquecer o líquido que vai para a caldeira em um recuperador (Obernberger et al., 2003).

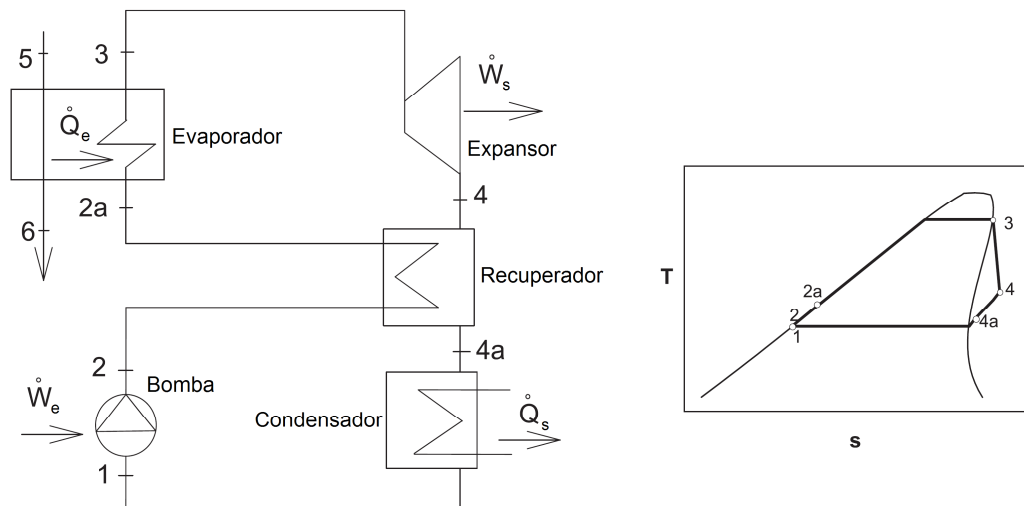


Figura 2.32. Esquema de uma central ORC e diagrama T-S do ciclo (Lai et al., 2011).

As unidades ORC podem operar com fontes de alta temperatura, como a biomassa, o que requer o uso de um fluido intermediário, normalmente óleo térmico, usado para fazer o intercâmbio de calor entre os gases quentes resultantes da queima de biomassa e o fluido do

ORC, já que a temperatura dos gases geralmente ultrapassa a temperatura crítica dos fluidos de trabalho. Geralmente o óleo térmico absorve o calor a uma temperatura de 300°C, e esta não deve ser maior para que o óleo mantenha suas propriedades (Shuster et al., 2009). Segundo Carrara (2010), as principais vantagens do ORC são:

- Não é necessário o uso de caixa de redução e a turbina pode ser ligada diretamente com o alternador devido às baixas velocidades rotacionais (permitido pela alta massa molecular dos fluidos orgânicos).
- Não há erosão nas palhetas da turbina, já que o ponto final da expansão é completamente seco, caso sejam utilizados fluidos e parâmetros adequados.
- A unidade possui uma vida útil prolongada, devido às baixas temperaturas de trabalho.
- Alta confiabilidade e disponibilidade.
- Não é necessário um sistema de tratamento da água.
- Grande simplicidade dos procedimentos de iniciar e encerrar seu funcionamento.

Na fase inicial de desenvolvimento de um ciclo ORC, é importante a definição do fluido de trabalho, pois ele tem grande influência no desempenho do sistema. O fluido deve ter propriedades físicas, ambientais, de segurança e econômicas favoráveis tais como baixo volume específico, baixa viscosidade e toxicidade, baixa inflamabilidade e baixos potenciais de aquecimento global e de depleção da camada de ozônio (Papadopoulos et al., 2009).

Na Figura 2.33 é possível observar o diagrama T-S de diferentes fluidos, onde as linhas de saturação são comparadas. Com base no ângulo de inclinação (θ) da linha tangente à curva de vapor saturado (dT/ds) em relação ao eixo x (entropia), pode-se classificar os fluidos em secos, úmidos ou isentrópicos. Uma inclinação positiva, $\theta < 87^\circ$, indica que o fluido é seco (e.g. Hexano), visto que a expansão em uma turbina no ponto de vapor saturado levará invariavelmente a um ponto de vapor superaquecido. Uma inclinação negativa, $\theta > 93^\circ$, indica que o fluido é úmido (e.g. Amônia), já uma inclinação próxima a 90° classifica o fluido com isentrópico (e.g. R141b). Na Tabela 2.12 também são mostradas as temperaturas e pressões críticas para diferentes fluidos.

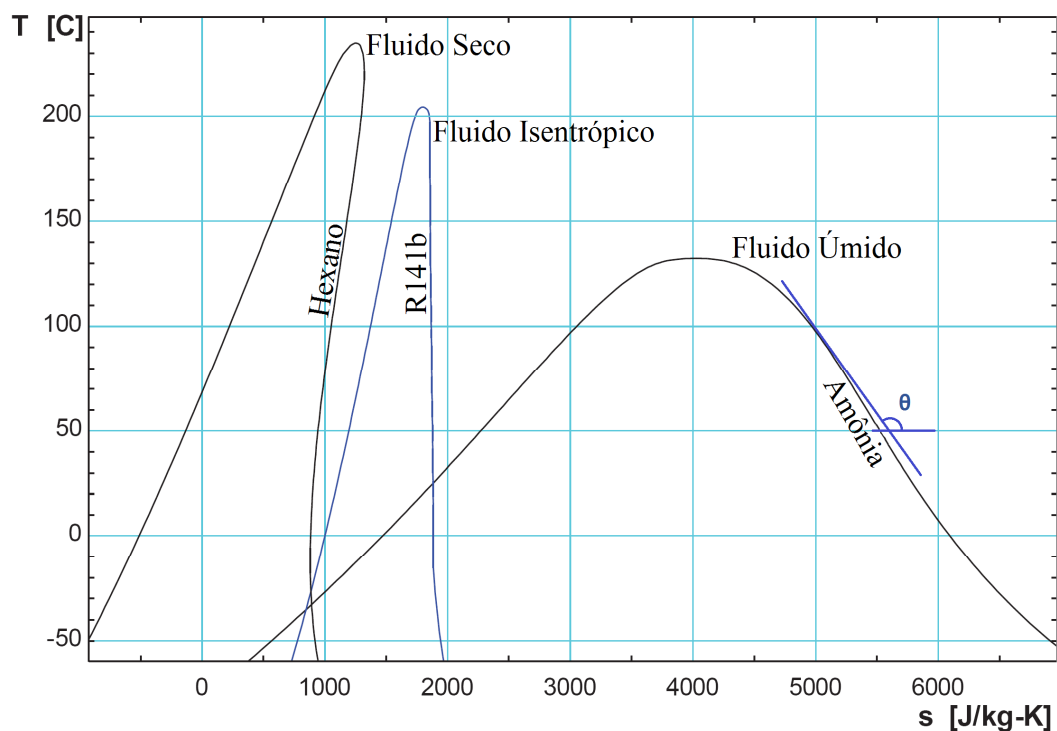


Figura 2.33. Exemplo de diferentes fluidos utilizados na tecnologia ORC.

Tabela 2.12. Características de diferentes fluidos utilizados na tecnologia ORC.

Fluido	T_c [K]	P_c [kPa]	θ
Água	647,2	22090	98,5
Tolueno	591,8	4106	80,1
Octametiltrisiloxano (MDM)	564,09	1415	54,2
R141b	478,85	4340	87,8
n-Pentano	464,78	3381	81,6
R134a	374,21	4059	92,0
R1270	365,59	4664	94,0

T_c = Temperatura crítica / P_c = Pressão Crítica

A escolha do tipo de fluido irá depender das características da fonte de calor e da aplicação pretendida, e não foi encontrada uma correlação que permita identificar o melhor fluido de acordo com suas propriedades e temperatura da fonte quente, portanto, na maioria dos estudos, o teste de vários fluidos de trabalho se faz necessário. Geralmente, em ciclos de alta temperatura, os fluidos secos favorecem o emprego de ciclos regenerativos devido à alta temperatura do fluido na saída do expensor, maximizando a geração de energia sem penalizar

a área total de troca de calor, devido à diminuição simultânea da área de troca do evaporador e do condensador (Sotomonte, 2015).

A potência típica do ORCs varia de 0,65 a 1,6 MWe com investimentos na ordem de 6500 a 9800 \$/kWe (Gerssen-Gondelach et al., 2014) sendo que as eficiências dos ciclos de alta temperatura atuais não passam dos 24% (Quoilin et al., 2013). Entretanto, a tecnologia se encontra em franco desenvolvimento. Por exemplo, a Turboden, uma das maiores empresa do mercado, já produz ORCs para alta temperatura com potências que variam 200 kWe a 15 MWe e eficiências elétricas de 18 a até 27% (Turboden, 2016). Em relação à biomassa, nada impede a construção de um ORC com maior potência e até em ciclos mais complexos e eficientes, entretanto, ao fazê-lo, a tecnologia passa a competir diretamente com o ciclo a vapor convencional, já estabelecido comercialmente, com altas eficiências e baixo custo.

CAPÍTULO 3. COMBUSTÃO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO

3.1. Princípios da Combustão de Gases

3.2. Queimadores de Gases da Carbonização

3.3. Queimador da UC Itacambira.

3.4. Inflamabilidade dos Gases da Carbonização

3.1. Princípios da Combustão de Gases

A combustão compreende as reações químicas envolvidas na oxidação de um composto químico. Se durante estas reações ocorre liberação de energia suficiente a aplicações industriais, diz-se que este composto é um combustível.

Em condições atmosféricas os combustíveis são substâncias geralmente estáveis, mas, em contato com uma fonte externa de energia, reagem em cadeia liberando energia na forma radiativa e convectiva. Tal capacidade única os fez ter papel de destaque no desenvolvimento da humanidade, possibilitando ao homem obter e manusear energia prontamente para transformação de produtos, condicionar ambientes e prover segurança, contribuindo para diminuir migrações e para a formação dos primeiros povoados, e enfim no desenvolvimento da humanidade. A “descoberta” do fogo, ou seu controle, ocorreu entre 400.000 ac. e 300.000 a.C., na idade da pedra. Antes deste período, acredita-se que sua utilização ocorria apenas de forma oportunista, encontrado em incêndios naturais (Roebroeks e Villa, 2011).

Pode-se dizer que o primeiro combustível do homem foram os resíduos florestais (biomassa), resultantes da captação da energia do sol e seu armazenamento na forma química através da fotossíntese. O carvão vegetal é uma evolução no uso da madeira, pois ele é mais leve, limpo e com maior relação energia/peso, gerando vantagens evolutivas aos povos capazes de dominar a arte de sua produção, incluindo a metalurgia do bronze e do ferro, possíveis apenas com o uso do carvão.

A grande parte dos combustíveis tem origem orgânica, e, portanto, são constituídos majoritariamente de carbono, hidrogênio e enxofre. Estes elementos reagem exotermicamente com o oxigênio atmosférico liberando calor (Eq. 3.1, 3.2 e 3.3).



A razão de ar teórico necessário para a combustão de um combustível é dada por sua reação estequiométrica, entretanto, na prática, esta quantidade de ar não é suficiente para permitir sua queima completa, devido a limitações de mistura e tempo de residência. Assim, é preciso uma quantidade de ar em excesso para que se atinja a combustão completa em condições reais. Portanto, a razão entre o ar estequiométrico e o ar efetivamente fornecido é um parâmetro importante do processo de combustão (Eq. 3.4), gerando uma subdivisão de três tipos de misturas, como mostra a Tabela 3.1.

$$\lambda = \frac{V_{\text{O}_2\text{real}}}{V_{\text{O}_2\text{est}}} \quad (3.4)$$

Em que,

λ = excesso de ar,

$V_{\text{O}_2\text{est}}$ = volume de O_2 calculado estequiometricamente;

V_{Arreal} = volume de O_2 fornecido.

Tabela 3.1. Tipos de misturas combustíveis. λ = excesso de ar

Misturas combustíveis		
Pobre em combustível	Estequiométrica	Rica em combustível
$\lambda > 1$	$\lambda = 1$	$\lambda < 1$

Outro parâmetro muito utilizado na combustão é a razão ar-combustível, que quantifica a relação entre a quantidade de ar e a quantidade de combustível na mistura, em massa (Eq. 3.5).

$$AF = \frac{m_{ar}}{m_{combustível}} \quad (3.5)$$

Apesar de necessário, o ar em excesso absorve calor da reação, deste modo existe um ponto de concentração ótimo de grande importância. Por esta razão o excesso de ar também é utilizado para controlar a temperatura no interior da câmara de combustão. A Tabela 3.2 pode ser utilizada como referência para se estimar o excesso de ar necessário para a queima de um determinado combustível.

Tabela 3.2. Valores usuais dos coeficientes de excesso de ar (Pinheiro, 1996).

Combustível	Tipo de Fornalha ou Queimador	Coeficiente de Excesso de Ar (λ)
Combustível Pulverizado	Aquatubular completa	1,15 - 1,20
	Aquatubular parcial tubo seco	1,15 - 1,40
Carvão Britado	Fornalha ciclone	1,10 - 1,15
	Grelha Fixa	1,30 - 1,60
Carvão	Grelha Vibratória	1,30 - 1,60
	Grelha rotativa	1,15 - 1,50
	Grelha fixa (alimentação por baixo)	1,20 - 1,50
Óleo combustível	Queimador de óleo tipo registro	1,3 - 1,4
	Queimadores multicomcombustível	1,05 - 1,20
Resíduo Ácido	Queimadores chama plana a vapor	1,10 - 1,15
Óleo Combustível	Queimador de pulverização mecânica com vapor auxiliar	1,05 - 1,15
Gás Natural	Queimadores tipo registro	1,05 - 1,10
Gás Coqueria	Queimadores multicomcombustível	1,07- 1,12
Gás de Alto Forno	Queimadores de bocal intertubos	1,15 - 1,18
Madeira	Grelha	1,20-1,25
Bagaço	Todas as fornalhas	1,25-1,35
Licor Negro	Fornalhas recuperação Kraft e Soda	1,05-1,07

Durante a combustão, uma pequena parcela de nitrogênio presente no ar reage com o oxigênio, principalmente, em altas temperaturas, como as que ocorrem em motores, turbinas e fornalhas, formando óxidos de nitrogênio, considerados poluentes, os quais contribuirão, por exemplo, para a formação de chuva ácida entre outros efeitos ambientais negativos, como o *smog* fotoquímico.

Toda reação química está acompanhada pela absorção ou pela liberação de energia, normalmente na forma de calor. Para mensurá-la, uma análise de volume de controle a pressão constante e sem geração de trabalho pode ser usada teoricamente, sendo que a máxima quantidade de energia é obtida quando os produtos são resfriados até a temperatura inicial e a água formada é condensada.

A conservação de energia aplicada a um reator a pressão constante, com H_p e H_r denotando a entalpia total dos produtos e dos reagentes, respectivamente, pode ser representada pela Eq 3.6:

$$-Q_{p_{cte}} = H_r - H_p \quad (3.6)$$

O valor negativo de Q indica o calor transferido ao ambiente, para fora do sistema. O poder calorífico do combustível é a diferença de entalpia entre os reagentes e os produtos. Q é geralmente referido como entalpia de combustão ou calor de reação, com o subscrito P_{cte} indicando que o valor é calculado a pressão constante. Portanto, o poder calorífico é reflexo de mudanças químicas ou físicas, e depende apenas do estado inicial e final do sistema.

No processo de combustão, reagentes são consumidos para formar os produtos e energia é liberada, a qual proveem da reorganização das ligações químicas dos reagentes para formar os produtos. A entalpia de formação quantifica a energia das ligações químicas das espécies, sendo elementos em sua forma mais estável como H_2 , O_2 e N_2 , tem entalpia de formação igual à zero.

Por convenção, os valores das entalpias de formação no estado padrão de referência são especificados na condição de $25^\circ C$ e 1 atm. Qualquer mudança em relação às condições padrão é acompanhada por uma mudança na entalpia, denominada de entalpia sensível.

A energia liberada na combustão, completa ou não, quando produtos e reagentes se encontram em um mesmo estado termodinâmico, pode ser calculada pela Eq. 3.7.

$$H_{cb} = \sum_i m_{p,i} (h_{f,p,i}^\circ + h_{sens,p,i}) - \sum_i m_{r,i} (h_{f,r,i}^\circ + h_{sens,r,i}) \quad (3.7)$$

Onde:

H_{cb} : entalpia de combustão [kJ/kg]

$m_{p,i}$: massa do produto i [kg]

$m_{r,i}$: massa do reagente i [kg]

$h_{f,r,i}^o$: entalpia de formação do reagente i nas condições de referência [kJ/kg]

$h_{sens,r,i}$: entalpia sensível do reagente i

$h_{f,p,i}^o$: entalpia de formação do produto i nas condições de referência [kJ/kg]

$h_{sens,p,i}$: entalpia sensível do produto i

Se todo o calor envolvido nas reações é aplicado apenas para aumentar as temperaturas dos produtos, H_{cb} se torna zero. À temperatura dos produtos neste caso é dado o nome de Temperatura de Chama Adiabática (TAC), e a Eq. 3.8 se torna a Eq. 3.8:

$$\sum_i m_{p,i} [h_{f,p,i}^o + h_{sens,p,i}(T_p)] = \sum_i m_{r,i} [h_{f,r,i}^o + h_{sens,r,i}(T_r)] \quad (3.8)$$

Através da equação 3.8, conhecendo a entalpia dos reagentes em função de sua temperatura (T_r), pode-se encontrar a temperatura dos produtos (T_p) que satisfaz a igualdade da equação, deste modo encontrando a TAC.

A TAC assume que todo o calor gerado é transformado em entalpia nos produtos da combustão, sem nenhuma perda de calor ao invólucro da câmara de combustão ou ao ambiente externo, o que, na prática, é uma situação impossível, pois nenhum processo real é adiabático. Entretanto, seu cálculo é útil em diversas aplicações quando, por exemplo, compara-se o calor e temperatura gerados por potenciais combustíveis com vista a suprir uma determinada necessidade.

A avaliação da temperatura real da chama depende do calor trocado na fornalha e do grau de dissociação dos produtos (reações endotérmicas) que passam a ter efeito significativo a partir de 2000 K. Em média, a temperatura real de chama é cerca de 65% a 85% da TAC, dependendo das condições da câmara de combustão (Lackner et al., 2013)

Ao calor liberado pela queima completa de um combustível a temperatura ambiente quando os produtos da combustão são resfriados até esta temperatura, é dado o nome de Poder Calorífico (PC), sendo este o máximo de energia que pode ser obtido através de sua queima em condições ambientes. Em função do estado físico que se encontra a água presente nos produtos da combustão, o poder calorífico é definido de duas maneiras:

Poder Calorífico Superior (PCS): obtido quando os produtos da combustão são resfriados até a temperatura ambiente, sendo que a água formada termina o processo no estado líquido e, portanto, a energia calculada inclui o calor latente de condensação da água. Deste modo, calcula-se o PCS como (Eq. 3.9):

$$PCS = \frac{h_p - h_{r(H_2O_{(l)})}}{m_{Comb}} [kJ / kg] \quad (3.9)$$

Em que, m_{Comb} é a massa de combustível que entra no sistema.

Poder Calorífico Inferior (PCI): obtido pela subtração do calor latente de condensação da água do PCS. Portanto, a água deixa o sistema no estado vapor, levando parte da energia liberada na combustão. Portanto, calcula-se o PCI como (Eq. 3.10):

$$PCI = \frac{h_p - h_{r(H_2O_{(g)})}}{m_{comb}} [kJ / kg] \quad (3.10)$$

Assim, a diferença entre o PCS e o PCI é a entalpia de vaporização da água na temperatura ambiente, contida nos produtos da reação (Eq. 3.11).

$$PCS = PCI + (m_p \times h_{lv})_{H_2O} \quad (3.11)$$

Onde m_p representa a massa de água presente nos produtos e h_{lv} é a entalpia de vaporização da água. No Sistema Internacional (SI), o poder calorífico é expresso em (kJ/kg) para combustíveis sólidos e líquidos e em (kJ/Nm³) para os gasosos.

Eficiências de motores e turbinas são baseadas no PCI, já que a água sai geralmente na forma de vapor nos gases de exaustão, e não é prático tentar recuperar o calor de vaporização. Entretanto, dependendo do tipo do sistema e da análise empregada, o PCS pode ser utilizado. Deste modo, a eficiência de combustão pode ser definida como (Eq. 3.12):

$$\eta_{cb} = \frac{Q}{PC} = \frac{\text{Quantidade de Calor liberado na Reação}}{\text{Poder Calorífico do Combustível}} \quad (3.12)$$

Uma combustão com 100% de eficiência indica que a combustão ocorreu de maneira completa e que os gases efluentes saíram do sistema a temperatura ambiente. A baixa eficiência da combustão causa problemas ambientais, gerando, por exemplo, resíduos carbonáceos (cinzas volantes), aerossóis, monóxido de carbono, entre outros poluentes.

3.1.1. Inflamabilidade de Gases

Simplemente colocar um combustível em contato com o oxigênio não é suficiente para iniciar sua combustão, é preciso que a mistura receba calor para que as reações de combustão tenham início.

Nas condições atmosféricas, para que ocorra a combustão espontânea (sem uma fonte de ignição), é preciso que a gasolina, por exemplo, atinja 260 °C, o hidrogênio atinja 580 °C, o monóxido de carbono 610 °C e o metano 630 °C. Além disso, a proporção de combustível na mistura ar/combustível deve estar entre limites apropriados, conhecidos como limites de inflamabilidade. Por exemplo, o gás natural em contato com uma fonte de ignição não queima em concentrações inferiores a 5% ou superiores a 15% no ar a pressão e temperatura ambiente. Estes limites são chamados de Limites de Inflamabilidade, e define-se:

LII - Limite inferior de inflamabilidade: é a mínima concentração de vapores de combustível em mistura com um comburente, abaixo da qual não se produz a combustão.

LSI. - Limite superior de inflamabilidade: é a máxima concentração de vapores de combustível em mistura com um comburente, acima da qual não se produz a combustão.

Pode-se dizer que abaixo do LII não há combustível suficiente para iniciar ou sustentar a chama. Da mesma maneira, em valores superiores ao LSI não há oxidante suficiente para a propagação da mesma. Os mesmos fatores que influenciam na reação de combustão são os que irão influenciar os limites de inflamabilidade, que são:

- Temperatura do meio;
- Pressão do meio;
- Volume do confinamento;
- Energia de ativação da reação de combustão – E;
- Taxa de decomposição térmica do combustível – k;
- Estrutura molecular e ligações atômicas;
- Densidade do combustível;

▪ Relação Oxidante/Material Energético (Concentração).

Os limites para diferentes combustíveis são determinados por testes laboratoriais padronizados. A concentração de combustível no LSI é usualmente três vezes maior que a concentração estequiométrica, e o LII 50% desta concentração. A tabela 3.3 lista os limites de inflamabilidade para alguns combustíveis.

Tabela 3.3. Limites de Inflamabilidade de alguns combustíveis, tendo o ar como oxidante (Glassman e Yetter, 2008)

	LII%	LSI%	Estequiométrico
Metano	5	15	9,47
Heptano	1	6,7	1,87
Hidrogênio	4	75	29,2
Monóxido de Carbono	12,5	74,2	29,5
Acetaldeído	4	60	7,7
Acetileno	2,5	100	7,7
Dissulfeto de Carbono	1,3	50	7,7
Óxido de Etileno	3,6	100	7,7

A energia de ativação da reação de combustão é a energia necessária para trazer os reagentes a um estado ativo, transformando os reagentes em produtos.

A Figura 3.1 mostra a relação entre a energia de ativação e o coeficiente de excesso de ar, onde fica claro que quanto mais distante do ponto estequiométrico se encontra a mistura mais energia é necessária para ativar as reações de combustão. Deste modo, um excesso de ar muito acima ou muito abaixo do estequiométrico pode inibir a combustão.

A temperatura da mistura tem papel fundamental na combustão e também nos limites de inflamabilidade. Temperaturas baixas significam baixas taxas de reação e maior energia de ativação requerida, e altas temperaturas levam a altas taxas de reação e menor energia de ativação. Isto é mostrado para o metano na Figura 3.2.

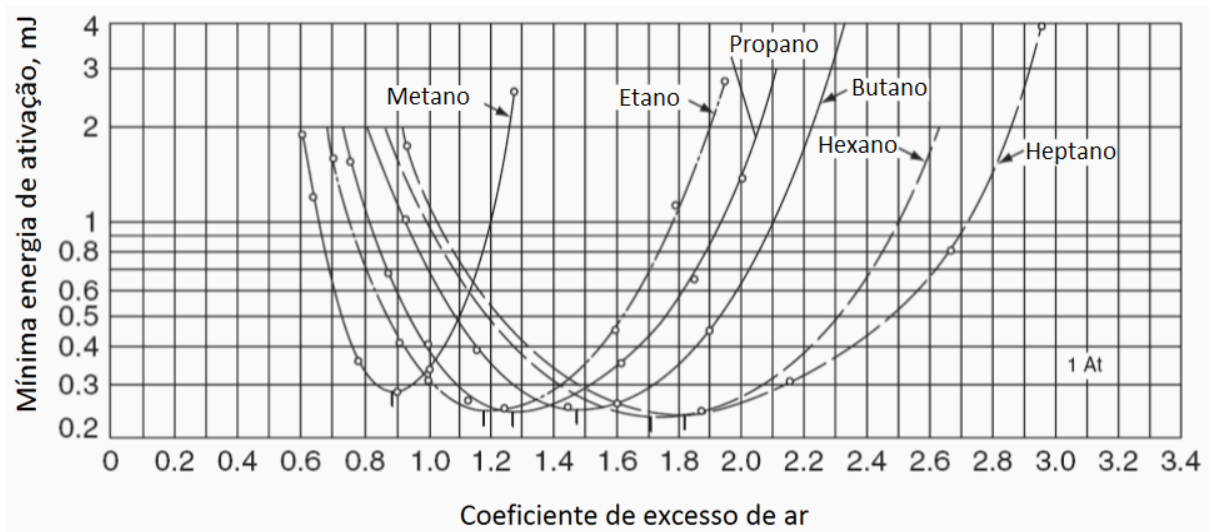


Figura 3.1. Energia de ativação para diferentes gases (Glassman e Yetter, 2008).

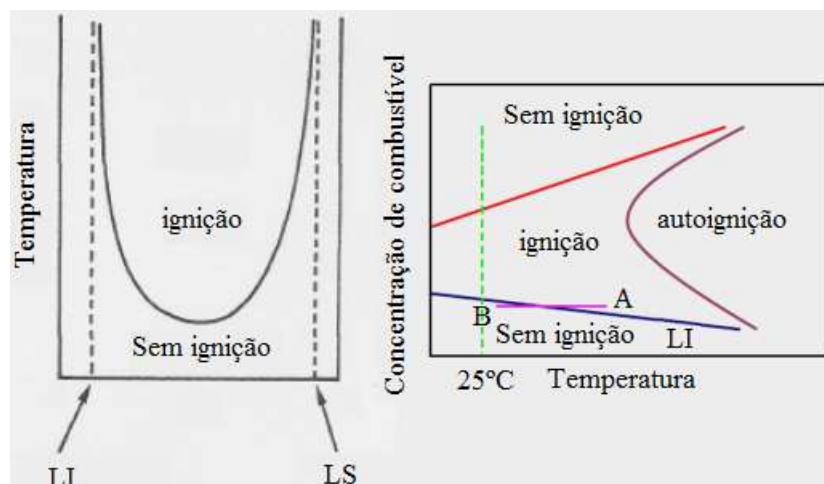


Figura 3.2. Influência da temperatura nos limites de inflamabilidade do metano (Mullinger e Jenkins, 2008).

Na Figura 3.3, do lado direito, quando se passa do ponto B para o ponto A pelo aumento de temperatura, ultrapassa-se o LII, fazendo com que a mistura se torne reativa nestas condições. O efeito na temperatura no LII para misturas simples no ar pode ser calculado com a lei de Burgess-Wheeler (Mullinger e Jenkins, 2008; Zhao, 2011), que prevê o efeito linear da elevação de temperatura como uma taxa para a temperatura original de referência, geralmente 25°C (Eq. 3.13).

$$LII_T = LII_{25} - \frac{0,75}{H_{cb}}(T - 25) \quad (3.13)$$

Em que:

LII_T = LII a temperatura T, °C

LII_{25} = LII a temperatura a 25°C, °C

H_{cb} = entalpia de combustão, kcal/kmol

Na Eq. 3.14, como a H_{cb} é negativa, um aumento de temperatura irá ocasionar uma diminuição no LII, tornando o gás mais inflamável

Se uma fonte de ignição é introduzida à uma mistura, os gases no entorno da fonte atingem temperatura suficiente para reagir com o oxigênio e produzem uma reação exotérmica que, por sua vez, libera energia suficiente para iniciar a queima de outra parcela de gases ao seu redor e assim adiante. Este processo começa a se propagar pela mistura, produzindo a chama, ou dependendo das condições do sistema, uma explosão. Normalmente, mesmo se a fonte de ignição for removida a chama continua a se propagar sem impedimentos. Entretanto, algumas misturas não irão sustentar a chama por atingirem concentrações abaixo do LII ou acima do LSI.

O fator primário que determina os limites de inflamabilidade é a competição entre o calor gerado, que é controlado pela entalpia de combustão e pela taxa de queima, e a taxa externa de perda de calor pela chama. Por esta razão, os limites de inflamabilidade são ampliados com o aumento da temperatura média da mistura.

Com o aumento da concentração de um gás não combustível na mistura o LII e o LSI tendem a se aproximar até se encontrarem. Inertes como o CO_2 , N_2 ou o ar não tem o mesmo poder de extinção de chama, que, na verdade, varia de maneira semelhante às suas propriedades. Por exemplo, a porcentagem mínima de oxigênio para permitir a propagação de chama da mistura CH_4 , O_2 e CO_2 é 14,6%. Se o N_2 substitui o gás carbônico como diluente, a porcentagem mínima cai para 12,1%, no caso do ar o valor é 9,8%. Deste modo, um gás com maior calor específico irá reduzir a temperatura final e, conseqüentemente, a taxa de liberação de energia necessária para sustentar a chama deverá ser maior. Este efeito é mostrado na Figura 3.3, onde nota-se que o hélio expande os limites por aumentar a difusão térmica e conseqüentemente os limites de inflamabilidade (Glassman e Yetter, 2008).

Na Figura 3.4 nota-se que os compostos orgânicos halogenados, bromometano (MeBr) e tetracloreto de carbono (CCl_4) reduzem o LII do metano de maneira diferenciada e mais eficiente em relação as outras substâncias, pois estes compostos bloqueiam quimicamente a cadeia de reações da combustão. Já os compostos inertes (gás carbônico, água, nitrogênio e hélio) são minimamente afetados pela combustão, sendo sua ação inibidora resultante da diminuição da superfície de contato entre o oxigênio e o combustível, e pela absorção do calor necessário à energia de ativação (Ansi/Isa, 1999; Dlugogorski et al., 1997).

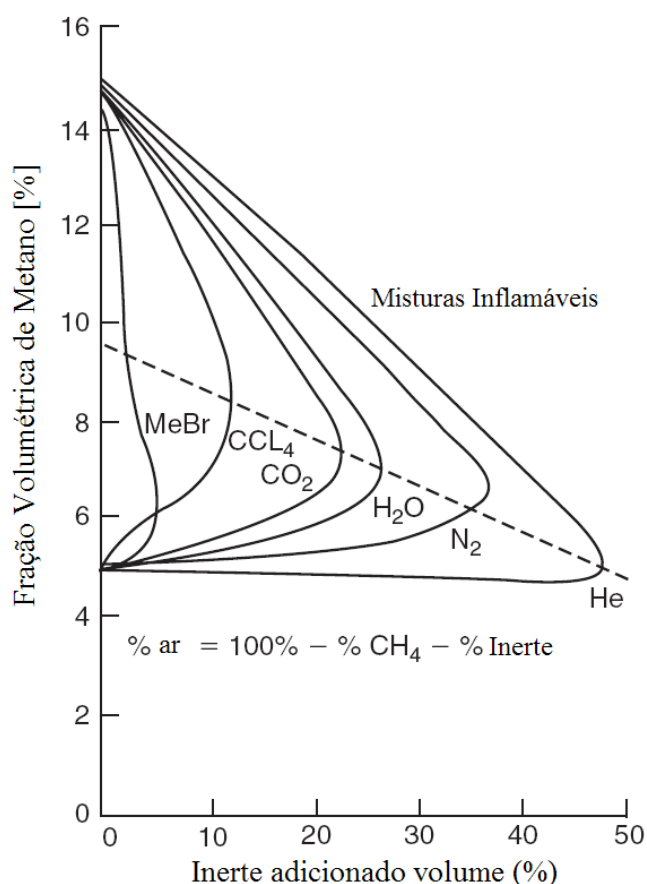


Figura 3.3. Limites de inflamabilidade de varias misturas inerte-metano-ar a 1 atm e 298 K (Glassman e Yetter, 2008).

Para uma mistura de combustíveis sem componentes inertes ($\text{CO}_2 + \text{N}_2 < 5\%$) os limites podem ser estimados pela fórmula de Le Chatelier, desde que se conheçam os limites individuais dos componentes da mistura. Esta lei é baseada na observação empírica de que o limite da mistura é proporcional à composição dos gases individuais (Eq. 3.14) (Mullinger e Jenkins, 2008).

$$L = \frac{100}{\frac{a_1}{L_1} + \frac{a_2}{L_2} + \dots + \frac{a_i}{L_i}} \quad (3.14)$$

Em que,

L = LII ou LSI, %

a_i = % do combustível i em base volumétrica componente na mistura

Os limites de inflamabilidade para misturas contendo gases inertes ($\text{CO}_2 + \text{N}_2 > 5\%$) podem ser determinados pela formula (Eq. 3.15).

$$L = \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{1 - \sigma}\right) 100}{100 + L \frac{\sigma}{1 - \sigma}} \quad (3.15)$$

Em que, $\sigma = \text{CO}_2 + \text{N}_2$

3.2. Queimadores de gases da carbonização

Ao longo dos últimos anos, as grandes empresas produtoras de carvão vegetal conduziram diversas experiências para encontrar alternativas relacionadas ao aproveitamento dos gases gerados na carbonização. Sabendo que no Brasil a cadeia comercial que abrange a produção, o processamento e o consumo da fração condensável do gás é incipiente, as pesquisas têm concentrado esforços no desenvolvimento de aparelhos capazes de converter termicamente os subprodutos da carbonização. Os equipamentos desenvolvidos para este fim ficaram conhecidos como Queimadores de gases da carbonização.

Deste modo, define-se um queimador dos gases de carbonização como o equipamento desenvolvido com o objetivo de queimar e assim mitigar o potencial poluidor dos componentes gasosos gerados durante a carbonização da madeira, de modo eficiente e contínuo.

Os queimadores visam principalmente à melhoria da qualidade do ambiente de trabalho na UC, o aproveitamento energético destes gases, e possíveis créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) ou outros mecanismos de compensação econômica-ambiental. Braga (2010) elenca as principais vantagens decorrentes da queima dos gases de carbonização:

- Melhorar a eficiência térmica do processo de produção de carvão vegetal, com o uso da energia da combustão dos gases no processo de carbonização, incluindo também a secagem prévia da madeira;
- Mitigação de GEE;
- Melhorar o ambiente de trabalho;
- Utilizar o calor gerado durante a queima na geração de energia elétrica.

Para serem inseridos no contexto de uma UC, é essencial que este equipamento não encareça o sistema produtivo e, portanto, tenha baixo custo de instalação e operação, o que limita a aplicação de tecnologias avançadas de combustão. Motivo pelo qual são normalmente construídos em alvenaria e componentes refratários. Geralmente, estão acoplados aos fornos de carbonização, para melhorar a sucção de gases do interior do forno para a fornalha e para evitar a queda de temperatura e a consequente condensação dos gases no sistema de coleta. A Figura 3.4 apresenta as dimensões típicas de um queimador retangular, a Figura 3.5 um queimador circular desenvolvido pela Arcelor Mittal.

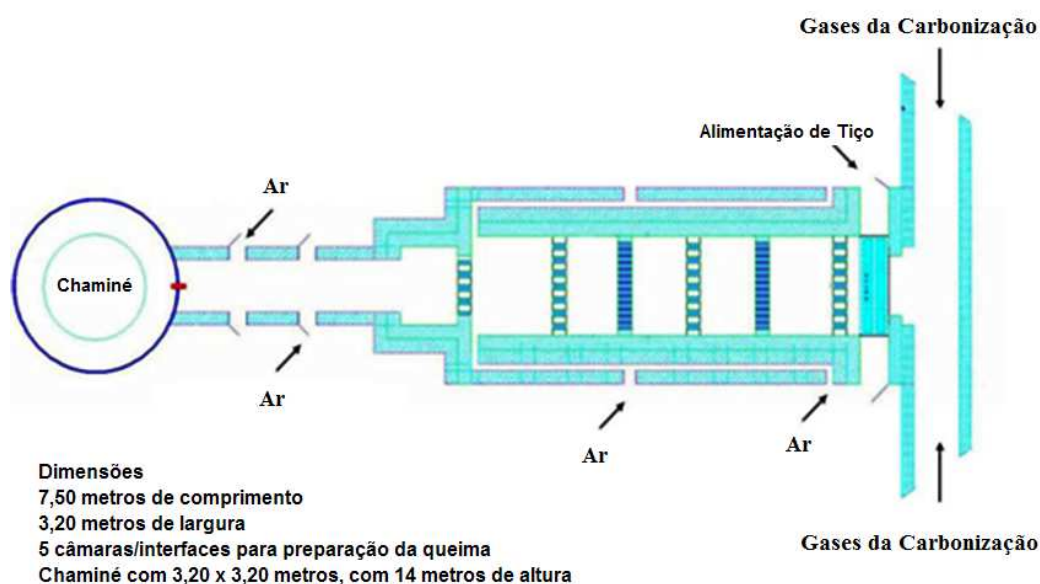


Figura 3.4. Queimador de Gases da Carbonização da Viena Siderúrgica (Duarte e Mota, 2010)



Figura 3.5. Queimador Circular da Arcelor Mittal ligado a dois fornos retangulares (Arcelor Mittal, 2012).

Os queimadores têm características construtivas semelhantes, diferindo apenas na forma (sendo alguns circulares), no tamanho e na localização das entradas de ar e combustível. São constituídos por uma grande câmara de combustão central onde os gases são comburidos, uma grelha com cinzeiro (geralmente localizada na entrada de gases) para a alimentação de tiço ou resíduos usados na ignição, entradas de ar com ou sem sistema de troca de calor com as paredes (para pré-aquecer o ar), uma zona de resfriamento dos gases resultantes da combustão e uma chaminé. Segundo Oliveira (2012), as temperaturas no interior da câmara de combustão podem atingir os 1200 °C, portanto, o uso de materiais construtivos adequados a tais temperaturas é de grande importância para a durabilidade do equipamento, como argamassa refratária e mantas cerâmicas onde haverá contato direto com o calor. Além de isolar termicamente, a manta cerâmica protege os tijolos ou outro material utilizado na construção, aumentando a eficiência do processo de combustão e elevando a vida útil da fornalha.

O desempenho de um queimador irá depender de diversas variáveis, como das suas dimensões, material construtivo, condições de operação e controle etc, que irão definir as condições das reações de combustão em seu interior, como temperatura, tempo de residência e excesso de O₂. Segundo Carneiro et al. (2012b), a taxa de queima média de um queimador é de 90% do total dos gases produzidos pelo processo. A Tabela 3.4 mostra um exemplo do desempenho de um queimador conectado a um forno de carbonização.

Tabela 3.4. Desempenho de um queimador de gases da carbonização (Barcellos et al., 2004)

Ponto de Prova	Antes do Queimador	Após Queimador
Concentração de Poluentes (mg Nm ³ h ⁻¹)	50.000	2
Saída de Gases (Nm ³ h ⁻¹)	550	5.700
Temperatura Média (°C)	90	430
Conteúdo de CO (% gases)	3	--
Conteúdo de CO ₂ (% gases)	5	6
Conteúdo de O ₂ (% gases)	15	15
Conteúdo de NO _x (ppm)	--	40-55
Conteúdo total de hidrocarbonetos (ppm)	12.000	20-30

Cardoso (2010) realizou testes em um sistema forno-fornalha, onde o queimador de gases está acoplado ao forno de carbonização. Segundo o estudo, o metano e o monóxido de carbono foram reduzidos em 96,95 e 93,76%, respectivamente. A quantidade de material particulado caiu 94,85%.

Durante a execução deste trabalho foi realizada uma visita técnica nos queimadores da Aperam Bioenergia, em sua UC localizada em Capelinha – MG, chamada de Unidade de Produção de Energia Lagoinha. A unidade conta com 20 fornos RAC220 e 22 fornos RAC700, com três queimadores de gases, o primeiro (mais antigo) ligado a 12 fornos RAC700, o segundo ligado a 4 fornos RAC 700 e a 12 RAC 220, e o terceiro com o restante dos fornos. A Figura 3.6 mostra uma vista geral da UC Lagoinha.

Os RAC700 possuem um ciclo de 17 a 18 dias (considerando as operações de carga e descarga), com 4 a 5 dias de carbonização e 12 a 13 de resfriamento. Segundo a empresa, como a estrutura dos fornos está bem padronizada, a variação do ciclo entre os fornos é de em média 12 a 20 horas, o que garante que 3 fornos, e no mínimo 2, sempre estejam no período de carbonização, isto para o queimador conectado a doze RAC700. Portanto quase sempre há um forno no início, um no meio e outro no final da carbonização. Com o aperfeiçoamento dos procedimentos adotados, a equipe da Aperam conseguiu queimar os gases da carbonização por 90 dias de maneira ininterrupta.



Figura 3.6. Vista Geral da UC Lagoinha da Aperam Bioenergia

Os fornos de carbonização são iniciados (ignição) e finalizados ligados ao queimador. De acordo com a empresa, os 3 equipamentos queimam praticamente a totalidade dos gases gerados na unidade e, segundo análises feitas por terceiros, com 100% de queima de metano e monóxido de carbono. Segundo as análises a temperatura na base da chaminé chegou a 1176 °C, porém o queimador não conta com sistema de aferição contínua de temperatura instalado.

O sucesso dos queimadores, segundo a empresa, é resultado do elevado volume interno da câmara de combustão, o qual possui uma estrutura retangular (semelhante aos demais quimadores) com teto em abóbada e 430 m³ de volume interno. A Figura 3.7 abaixo mostra o queimador retangular da Aperam. A estrutura do equipamento é feita de tijolo comum do lado de fora e revestido por manta cerâmica em seu interior capaz de suportar temperaturas de até 1500 °C.



Figura 3.7. Queimador de gases retangular da Aperam Bioenergia.

Já o queimador de gases da desenvolvido no projeto da Arcelor Mittal e da Cemig (Figuras 3.8 e 3.9), discutido no item 2.4.1, possui um volume bastante reduzido, 38 m³. Isto só é possível pois o equipamento trabalha com um sistema de pré-aquecimento dos gases (explicado no item 2.4.1) e com 2 sistemas auxiliares que queimam biomassa ou Diesel para aquecer o equipamento e auxiliar em sua ignição.

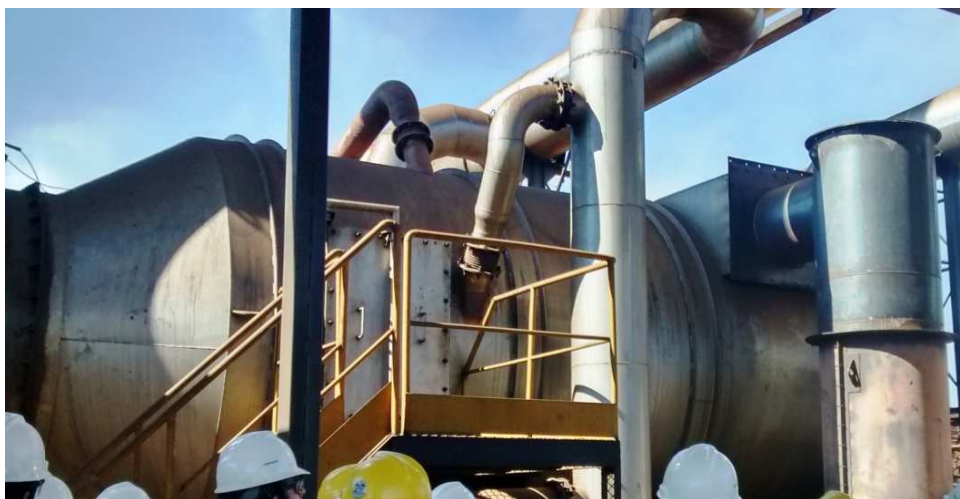


Figura 3.8. Queimador de gases do projeto EFGT - Arcelor/Cemig



Figura 3.9. Queimador de gases do projeto EFGT - Arcelor/Cemig, vistas parciais.

Segundo Castro (2014), para iniciar a queima dos gases da carbonização no queimador da Arcelor/CEMIG, o equipamento precisa estar a uma temperatura próxima de 600°C, a tubulação usada no pré-aquecimento dos gases a 120 °C e os gases de saída do forno de carbonização no mínimo a 140 °C, o que indica a geração de gases com bom poder calorífico. Segundo a empresa, o queimador desenvolvido consegue manter a queima de maneira autônoma, sem a necessidade de combustível auxiliar após a ignição, e com eficiência, atingindo 100% de queima de CO e CH₄.

3.3. Queimador da UC Itacambira

Para a melhor compreensão do problema da queima dos gases de carbonização, visitas técnicas foram realizadas na UC da Plantar Siderúrgica S.A em Itacambira (MG) pelo autor, com objetivo de acompanhar e avaliar o funcionamento do seu queimador piloto de gases da Carbonização.

Apesar de comprovada a possibilidade da queima dos gases, a técnica envolvida neste processo ainda não se encontra em estágio maduro. A fumaça produzida pelos fornos não é de fácil combustão por dois motivos. Primeiro porque o gás da carbonização é pobre energeticamente, devido à grande quantidade de água, gás carbônico e nitrogênio que diluem o gás combustível em termos de concentração de componentes combustíveis (H_2 , CO e CH_4), reduzindo seu poder calorífico a concentrações suficientes para deixá-lo abaixo de seu limite inferior de inflamabilidade. Depois, porque sua composição varia durante o tempo, com mudanças significativas no poder calorífico. Esta variação é ainda maior nos grandes fornos retangulares, ocorrendo de forma brusca e pouco previsível, como será mostrado no capítulo 4, que trata do potencial energético dos gases nos fornos retangulares.

Portanto, desenvolver um equipamento capaz de queimar o gás de carbonização é um desafio tecnológico atual. A maioria dos queimadores industriais de gás não está preparada para lidar com o gás de carbonização e as empresas tem procurado o uso de alternativas baratas e viáveis para lidar com o problema, pois o mercado de ferro gusa não permite o encarecimento do processo produtivo do carvão vegetal.

Para tentar queimar o gás nos momentos em que ele não apresenta inflamabilidade, algumas empresas utilizam um subproduto da carbonização, o tiço (madeira parcialmente carbonizada), para fornecer energia auxiliar a combustão. Entretanto, o tiço também pode ser convertido em carvão vegetal se forem submetidos a um novo processo de carbonização, por este motivo usar o tiço para queimar os gases residuais significa perda de produtividade. Além do mais, dependendo da tecnologia empregada, o tiço não consegue cumprir sua função na totalidade do tempo, sendo sua queima insuficiente para iniciar ou manter a combustão de gases energeticamente pobres.

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos no queimador de gases de carbonização da Plantar Siderúrgica, localizado na UC Itacambira. A Figura 3.10 a seguir mostra o layout do queimador de gases no interior da UC.

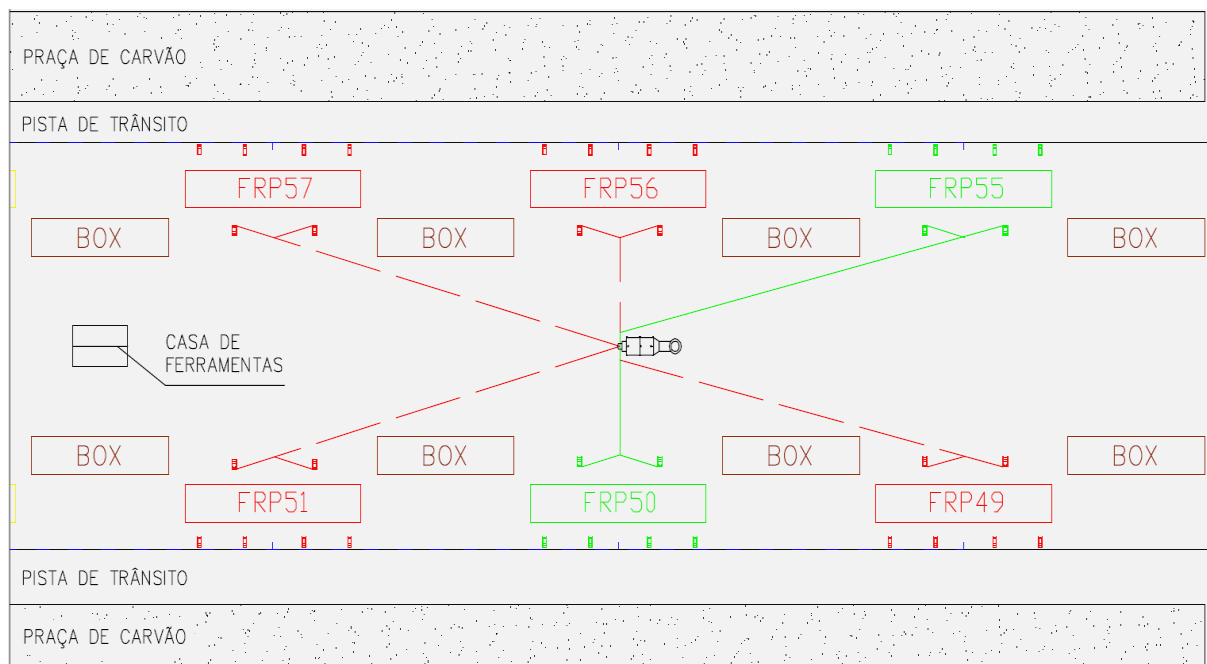
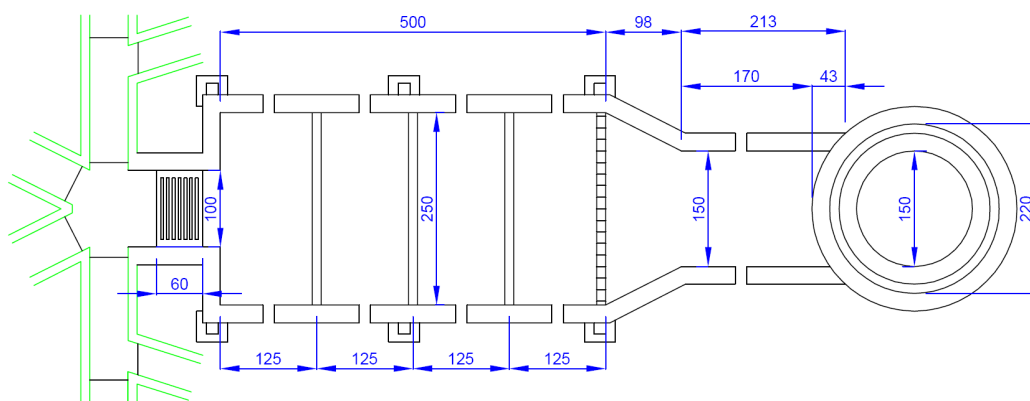


Figura 3.10. Layout dos fornos e queimador central na UC Itacambira (FRP=Forno Retangular Plantar).

Hoje, mais seis fornos retangulares estão conectados ao mesmo queimador, totalizando doze fornos. As Figura 3.11 e 3.12 mostram os detalhes construtivos do queimador.



Vista Superior - Duto de condução, Fornalha, Camara de Combustão e Chaminé

Figura 3.11. Detalhes construtivos do Queimador de gases da UC Itacambira.

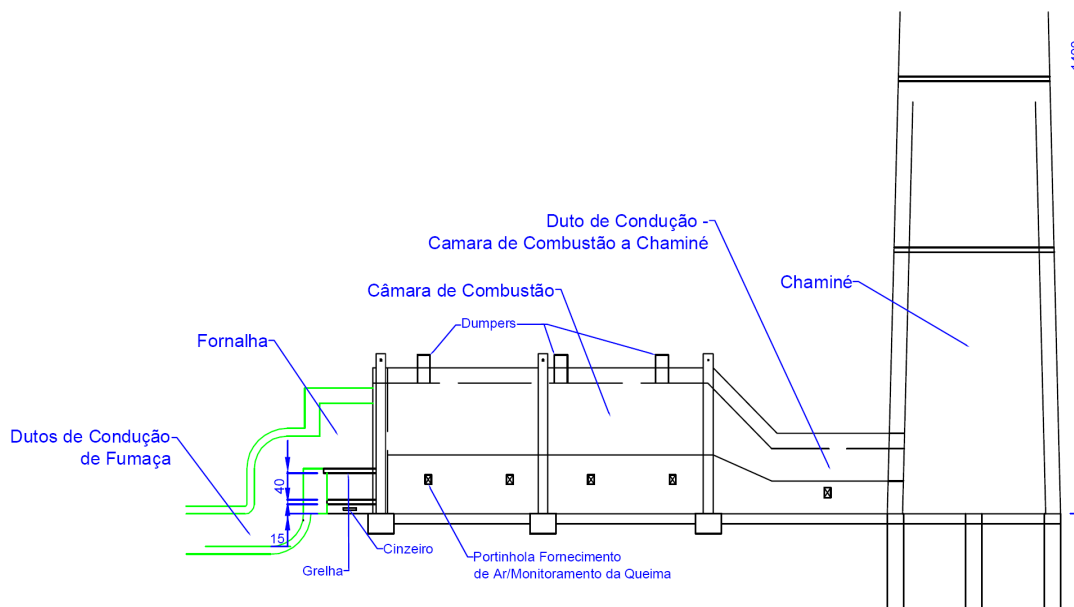


Figura 3.12. Detalhes construtivos do queimador de gases da UC Itacambira.

O projeto foi desenvolvido pela Plantar e foi concebido para queimar os gases provenientes de 5 fornos retangulares, contando que os 7 restantes estarão em fase de resfriamento, carregamento/descarregamento ou em manutenção.

3.3.1. Resultados e Discussão sobre os Testes no Queimador da UC Itacambira

No projeto apresentado acima foram realizados cerca de 20 testes de queima pela Plantar, os quais contaram com a presença do autor. Nos teste pode-se coletar dados do perfil de temperatura dentro do queimador e, somente em alguns casos, a composição de metano, oxigênio e gás carbônico na entrada e na saída do equipamento.

A Figura 3.13 a seguir mostra os pontos onde estão localizados os termopares no queimador, que coletam os dados de temperatura ao longo do período de testes.

As análises de gases foram realizadas por um analisador de gases portátil, e não puderam ser feitas em todos os testes e nem de maneira contínua (durante todo o tempo do teste). Todas as análises foram pontuais e aferidas em triplicadas e a cada três minutos, portanto os resultados apresentados representam a média destas medições para um período de nove minutos em um ponto de medição (entrada ou saída do queimador).

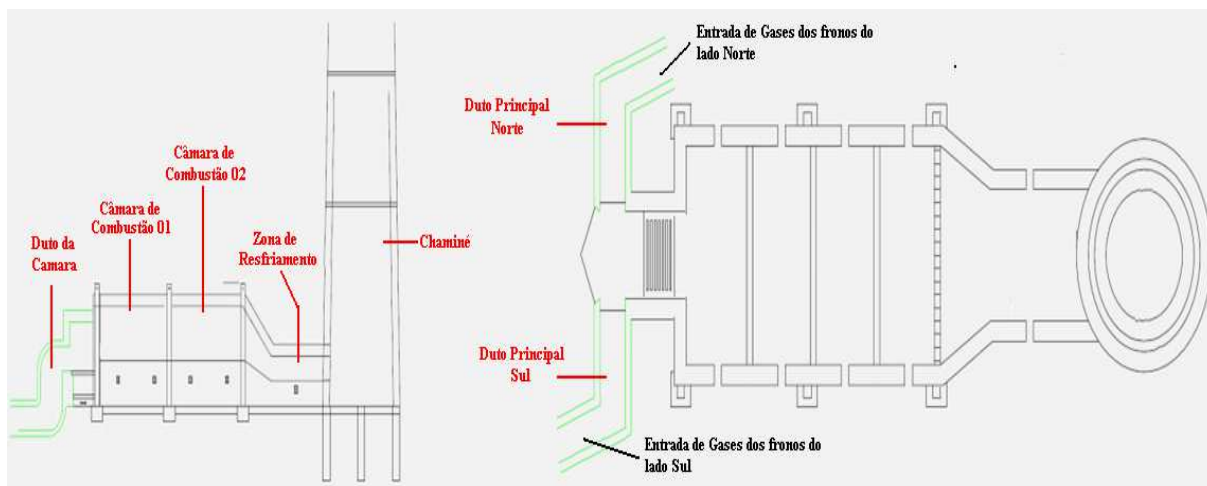


Figura 3.13. Localização dos termopares no queimador da Plantar.

A Figura 3.14 mostra, como exemplo, o perfil térmico do Teste 09, onde pode-se observar com clareza o problema da não combustão dos gases da carbonização.

No início do teste 09, ainda somente com um forno conectado, o queimador entrou em ignição, o que pode ser notado no primeiro pico de temperatura (Câmara de Combustão 02), entretanto ocorreu um retorno de chama que chegou a atingir o duto norte, o que pode ser observado pelo aumento da temperatura no duto norte. Com a situação contornada, a porta da grelha de tiço foi fechada e a queima teve início como pode ser observado no gráfico (início do pico central).

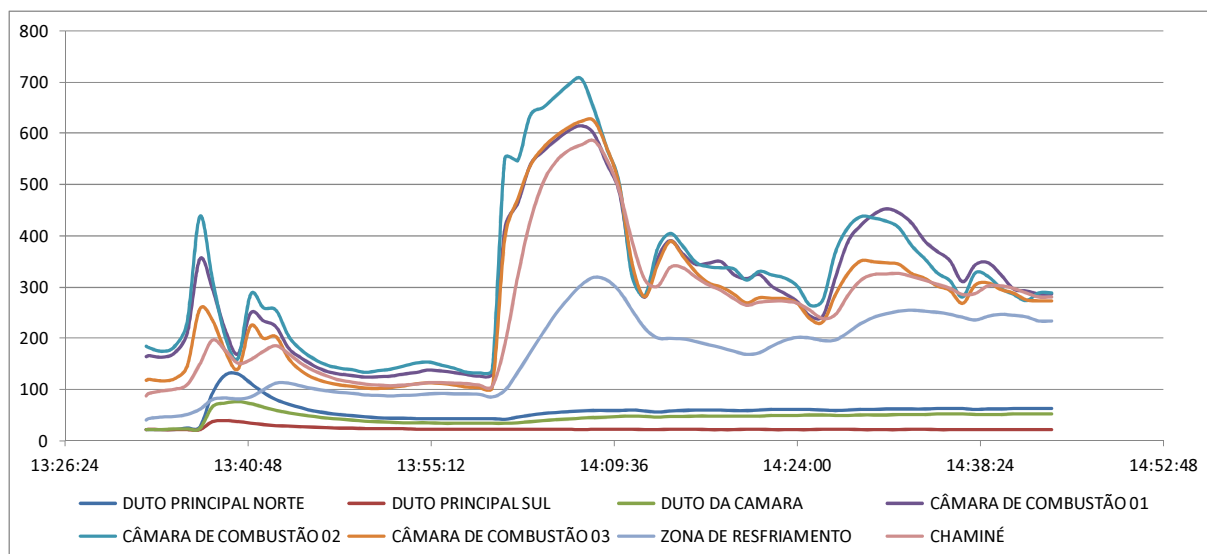


Figura 3.14. Perfil térmico do teste 09 realizado no queimador da UC Itacambira

A combustão dos gases se manteve por cerca de 10 minutos. No final deste período, extrato pirolenhoso começou a verter em um orifício localizado abaixo do duto da câmara, indicando o aumento da umidade dos gases, no mesmo momento as temperaturas começaram a baixar e a chama se manteve fraca apesar das tentativas de reiniciá-la com aumento na alimentação de tiço. Entretanto, isto não pode ser comprovado, pois não foram realizadas aferições na quantidade de água presente nos gases da carbonização.

O aumento da umidade dos gases observado pode mostrar a importância da umidade em relação a sua capacidade de interferir na combustão. Enquanto a umidade estava baixa a chama foi mantida, entretanto, com seu aumento, logo as temperaturas baixaram e a chama sofreu rápida interferência.

Outra dificuldade que impediu a queima constante dos gases foi o retorno da chama para os dutos que conduziam a fumaça dos fornos ao queimador, mostrando que a velocidade do fluxo de combustível é menor que a velocidade de chama. Atingir o equilíbrio de chama não é uma tarefa simples, tendo em conta que a composição dos gases de carbonização varia constantemente, e por sua vez as dimensões do queimador são estáticas, e não há meio mecânico para controlar a vazão de combustível no equipamento.

No Teste 18 foi possível avaliar a composição dos gases na entrada do queimador de acordo com o número de fornos conectados ao mesmo. No teste, havia quatro fornos no período de carbonização (F14, F15, F18 e F20), aptos a conexão com o queimador, como mostra a Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Situação dos fornos no teste 18.

Tipo	Forno	Ciclo	Umid. da madeira	Classe diâmetrica	Status	Ignição	Dias Carb.	Término da Vedação	Dias Resf.	Previsão de descarga
5	13	75°	27,20%	GROSSA	RESF.	23/11/2013 04:00		28/11/2013 03:45	4,3	08/dez
3	14	78°	46,67%	GROSSA	CARB.	28/11/2013 02:45	4,3			
3	15	81°	44,47%	GROSSA	CARB.	30/11/2013 22:00	1,5			
5	16	77°	27,60%	GROSSA	RESF.	23/11/2013 20:00		26/11/2013 03:30	6,3	06/dez
3	17				PARADO					
5	18	79°	46,67%	GROSSA	CARB.	30/11/2013 00:15	2,4			
3	19	76°	31,39%	GROSSA	RESF.	20/11/2013 03:30		26/11/2013 04:00	6,3	06/dez
3	20	74°	46,67%	GROSSA	CARB.	01/12/2013 03:00	1,3			
3	21				PARADO					
5	22	72°	29,41%	GROSSA	RESF.	15/11/2013 01:00		19/11/2013 04:00	13,3	29/nov
5	23	76°	26,96%	GROSSA	RESF.	25/11/2013 00:15		29/11/2013 10:30	3,0	09/dez
3	24	73°	29,63%	GROSSA	RESF.	22/11/2013 01:00		27/11/2013 15:50	4,8	07/dez

Foram realizadas análises individuais na entrada de gases do queimador, conectando apenas um forno de cada vez, e depois com os fornos em conjunto. A sistemática das análises pode ser observada na Tabela 3.6. Com base nos resultados destas análises, a Figura 3.15 é apresentada.

Como pode ser observado na Tabela 3.5, tanto a madeira quanto o estágio de carbonização é diferente para cada forno, o que explica as diferenças na variação de oxigênio observadas na Figura 3.16, já que fornos no estágio inicial da carbonização recebem mais oxigênio para aumentar a temperatura em seu interior, enquanto os fornos em carbonização avançada (onde já foi atingida a temperatura de pirólise) as entrada de ar são parcialmente fechadas. A Figura 3.16 mostra os resultados das análises feitas na entrada do queimador com os fornos conectados em conjunto.

Tabela 3.6. Análises feitas no teste 18 na entrada do queimador.

Análise	Fornos Conectados ao Queimador
Análise 1	F15
Análise 2	F14
Análise 3	F20
Análise 4	F18
Análise 5	F18+F20
Análise 6	F18+F20+F15
Análise 7	F18+F20+F15+F14

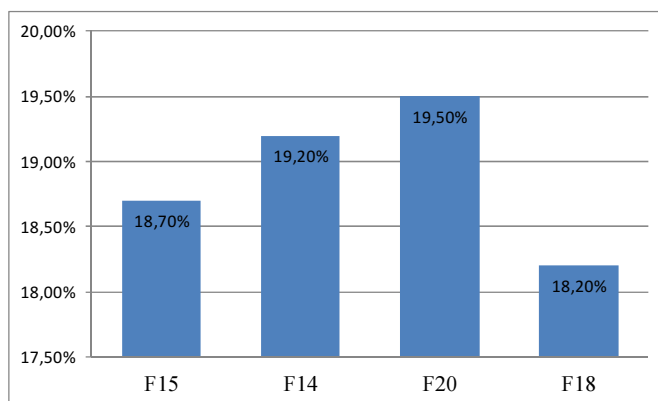


Figura 3.15. Concentração de oxigênio na entrada do queimador com diferentes fornos conectados.

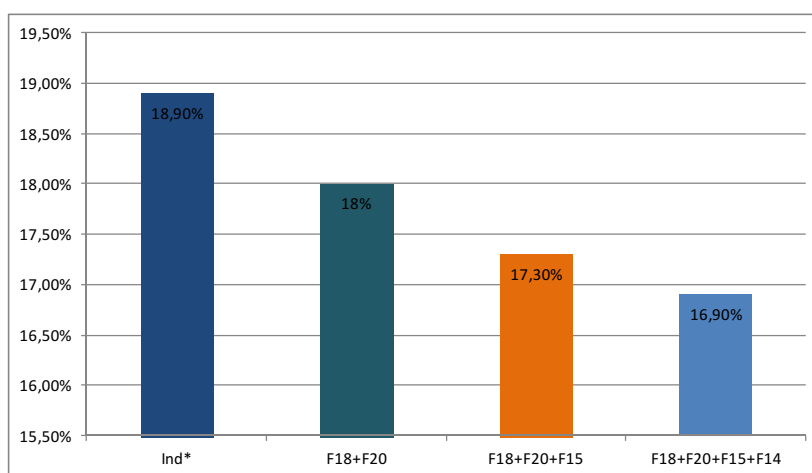


Figura 3.16. Concentração de oxigênio na entrada do queimador com fornos conectados em conjunto. *média das medidas individuais dos fornos

Ao analisar a Figura 3.17, observa-se uma queda na concentração de oxigênio à medida que se aumenta o número de fornos conectados ao queimador. Como a concentração de O_2 nos fornos em conjunto (16,9%) é menor que qualquer concentração individual dos fornos (Figura 3.16), acredita-se que esta queda na concentração possa estar relacionada à existência de entradas não controladas de ar no sistema de condução de fumaça, que não é hermético devido a falhas existentes nas portas que controlam a saída da fumaça de cada forno. Deste modo, quanto mais fornos estão conectados, menos portas estarão disponíveis para entradas falsas de ar. Entretanto, esta hipótese não pôde ser comprovada, pois não foi possível medir a vazão de fumaça de cada forno, bem como a vazão das entradas falsas de ar.

A Figura 3.17 apresenta a concentração de CH_4 na entrada do queimador em relação ao número de fornos, ainda no teste 18. Os resultados mostraram aumentos na concentração de

CH₄ com o acréscimo na quantidade de fornos conectados, o que já era esperado, já que os últimos fornos a serem conectados se encontravam em um estágio mais avançado de carbonização e, portanto, deveriam produzir mais metano.

Nos testes 19 e 20 foi realizado o mesmo tipo de análise. Seus resultados são apresentados nas Figuras 3.18 e 3.19.

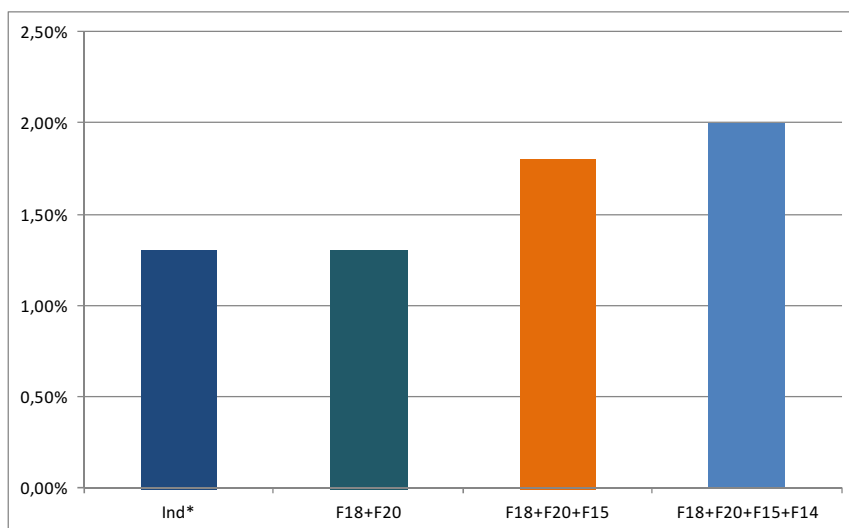


Figura 3.17. Concentração CH₄ na entrada do queimador em relação ao número de fornos conectados.

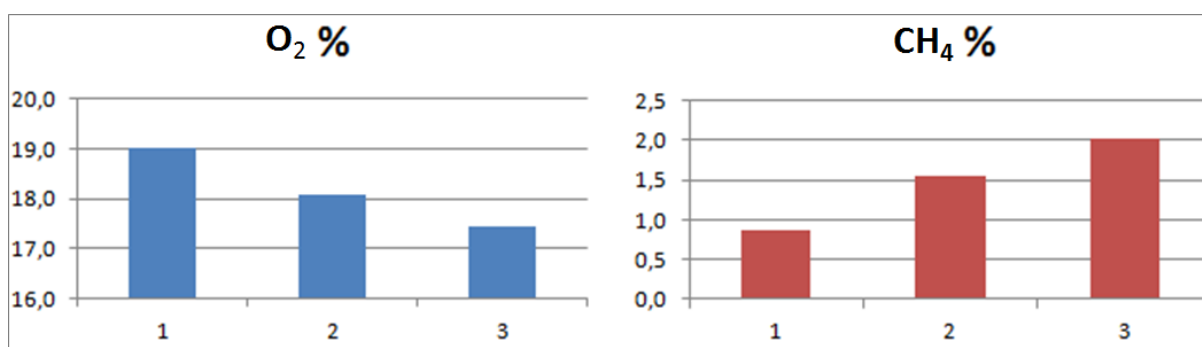


Figura 3.18. Concentração de O₂ e CH₄ na entrada do queimador em relação ao número de fornos no teste 19.

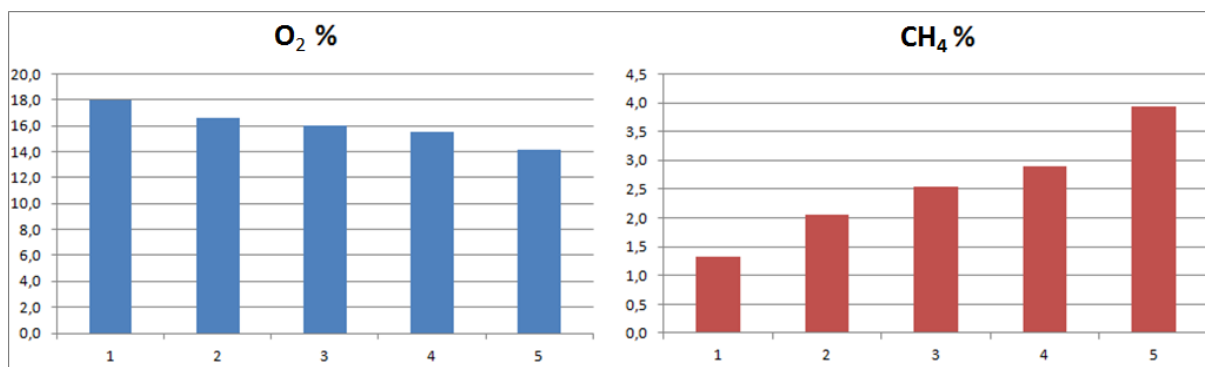


Figura 3.19. Concentração de O₂ e CH₄ na entrada do queimador em relação ao número de fornos no teste 20.

Assim como no teste 18, à medida que se aumenta a quantidade de fornos conectados ao queimador observa-se uma diminuição na concentração de oxigênio e um aumento na concentração de Metano.

No teste 20 foi possível realizar análises na entrada e na saída (chaminé) do queimador, após a combustão dos gases, quando o queimador estava conectado aos cinco fornos em carbonização, como mostra a Figura 3.20.

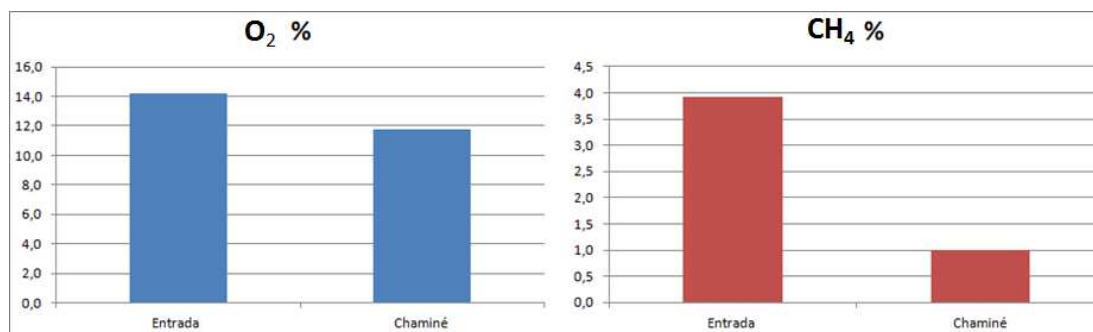


Figura 3.20. Resultados comparativos da queima de gases no teste 20.

Nota-se que o metano estava sendo parcialmente queimado, revelando que ocorria queima incompleta de gases durante o teste. Da mesma maneira que em vários testes, ocorre uma combustão parcial dos gases e ainda de maneira inconstante, pois a queima nem sempre era observada.

A Figura 3.21 mostra a concentração de metano, dióxido de carbono e oxigênio em relação ao tempo, na saída do queimador. Nota-se que quanto menor a queima, indicada pelo aumento do conteúdo de oxigênio e a diminuição do conteúdo de dióxido de carbono, menor é a taxa de queima de metano, como esperado em uma reação de combustão.

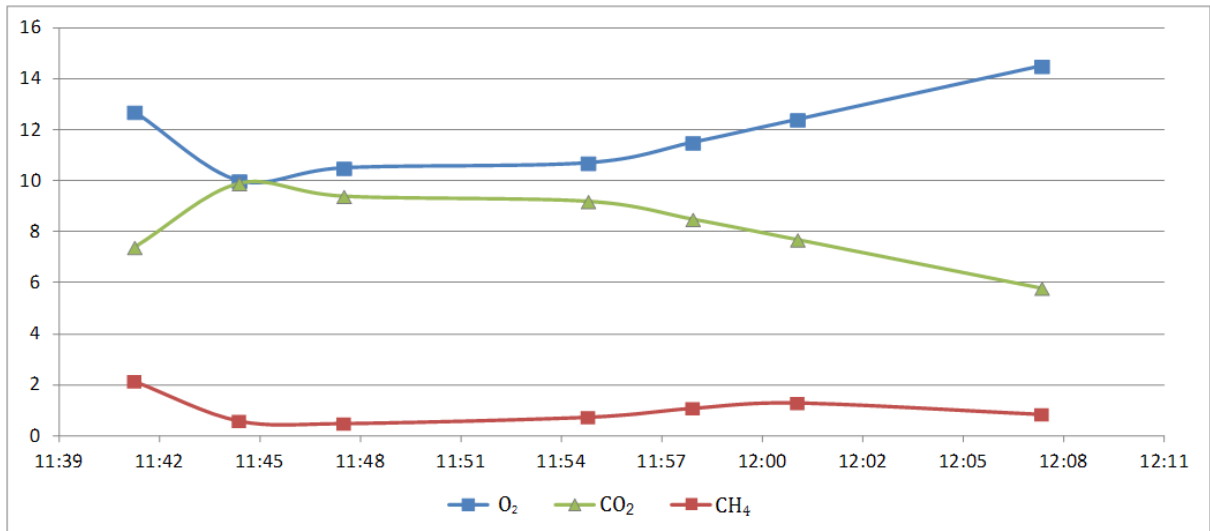


Figura 3.21. Concentração de metano, dióxido de carbono e oxigênio na saída do queimador durante o teste 20.

O gráfico de temperatura do teste 20 pode ser observado na Figura 3.22. Como inexistem mecanismos de controle no queimador, os operadores ficam limitados a controlar apenas as entradas de ar do equipamento, sendo a abertura da porta de tiço uma delas. Como pode ser visto na Figura 3.23, a abertura desta porta cessava a combustão, em razão da perda de temperatura (entrada de ar frio) e diluição da concentração de gases.

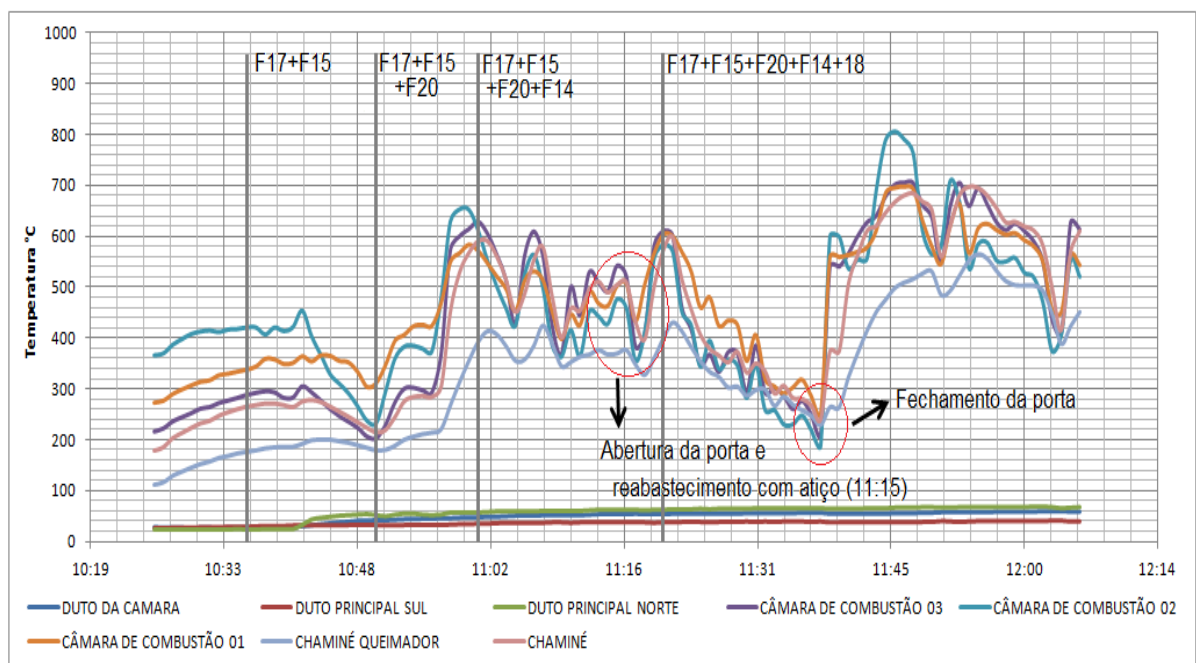


Figura 3.22. Gráfico de temperatura do teste 20.

A Figura 3.23 mostra outro exemplo de queima de gases, mostrando os resultados comparativos da queima no teste 21 com cinco fornos conectados ao queimador, onde novamente os resultados revelaram queima incompleta de gases durante o teste, em razão da inconstância da queima dos gases.

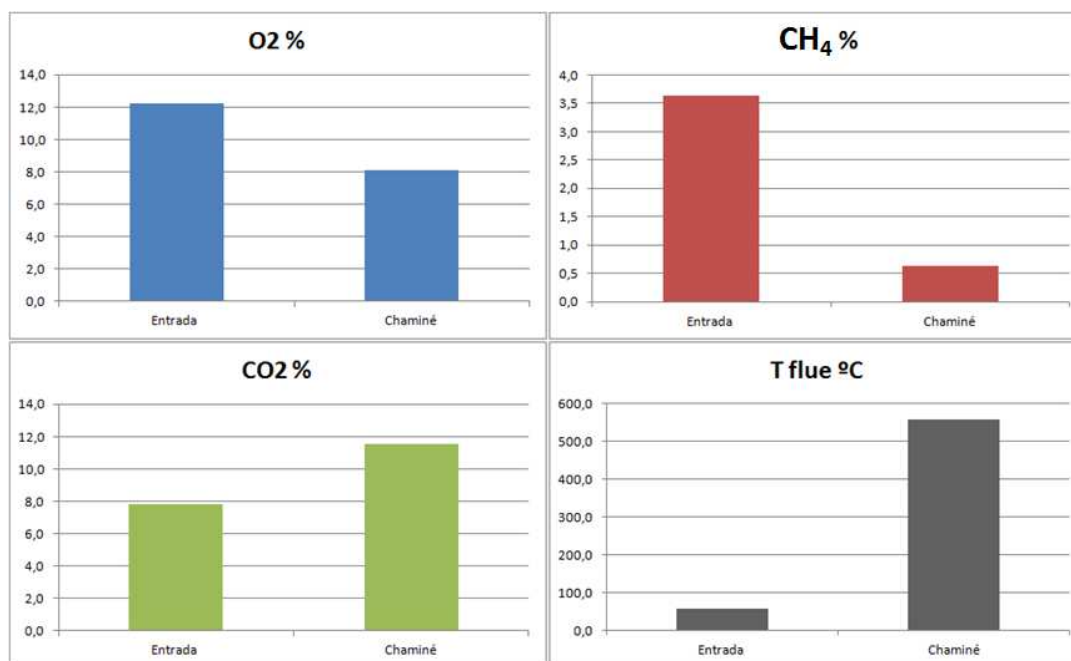


Figura 3.23. Resultados comparativos da queima de gases no teste 21 com cinco fornos.

Em resumo, durante os testes foram identificadas as seguintes situações:

A. Não combustão ou combustão parcial dos gases levados ao queimador.

Este problema ocorre quando os gases têm baixo poder calorífico devido à alta umidade e alta diluição. Duas medidas podem ser utilizadas para melhorar este problema:

1. Trabalhar com maior número de fornos, para diminuir a diluição do combustível, e aumentar o poder calorífico da fumaça;
2. Aumentar a temperatura do queimador com uso de um combustível auxiliar de maior qualidade que o tiço, para que os gases atinjam o limite de inflamabilidade.

B. Diminuição da concentração de O₂ e aumento da concentração de CH₄ com o acréscimo no número de fornos conectados.

Esta conclusão mostra a importância de se trabalhar com o maior número de fornos conectados ao queimador, pois estes três fatores favorecem a inflamabilidade dos gases.

- C. É preciso manter o queimador em alta temperatura para que os gases ganhem temperatura na parte inicial e atinjam sua inflamabilidade do meio para o final do equipamento.

Este foi o fato mais importante observado, principalmente no teste 21, que mostrou claramente este aspecto dos gases de carbonização, onde os gases ao chegarem no queimador se encontram abaixo do LI e precisam ganhar temperatura para que sua ignição ocorra. É conhecido que o aumento da temperatura de um combustível aumenta sua inflamabilidade e durante os testes notou-se que na parte inicial do queimador os gases ganhavam temperatura e produziam chama do meio para o final do equipamento. Portanto em projetos futuros é importante avaliar a existência de uma área de pré-aquecimento do gás, que pode ser realizada com o aumento do volume do queimador, com a recirculação de gases, ou com a troca de calor com os gases da chaminé.

Um queimador com maiores dimensões possibilitaria um maior tempo de residência dos gases na câmara de combustão, possibilitando tempo suficiente para que os gases troquem calor dentro da câmara de combustão e atinjam seu ponto de inflamabilidade.

Com os resultados observados no queimador da Plantar, e a análise de queimadores em outras empresas, ficou claro que o aumento nas dimensões do queimador iria auxiliar na queima.

Deste modo, o queimador passou por uma modificação que teve por objetivo aumentar as dimensões de sua câmara de combustão e, conseqüentemente o tempo de residência dos gases no interior do equipamento. Esta mudança gerou um incremento na troca de calor entre os gases frios da entrada e os gases quentes já comburidos, melhorando o processo de combustão por promover a inflamabilidade dos gases de entrada.

Já no primeiro teste, o equipamento modificado se mostrou bastante eficiente na queima dos gases, mesmo quando trabalhando com poucos fornos (até dois) e com gases de baixa caloria (no início da carbonização), tiço foi usado apenas na ignição, sendo que os próprios gases mantiveram a queima constante durante todo o período de teste. Entretanto, ao final do teste ocorreram problemas estruturais devido à expansão térmica dos tijolos refratários no interior do equipamento e o teste teve de ser interrompido.

Devido a este problema, o Queimador teve suas paredes internas de tijolo refratário remodeladas, com a inserção de mais juntas de dilatação, aletas transversais e montagem por equipe especializada.

Como exemplo, o gráfico parcial de temperaturas, apresentando 12 horas de operação, de um dos testes realizados no novo queimador é mostrado na Figura 3.24.

No início da Figura 3.25, o queimador já operava com apenas o forno F22 (com 48h de carbonização) desde o dia anterior, então a fumaça dos fornos F15 e F19 foram encaminhadas ao equipamento, os quais tiveram sua ignição na madrugada e, portanto, se encontravam ainda no início do processo. Como resultado as temperaturas subiram gradativamente até os 900 °C. Neste dia o queimador trabalhou de maneira estável, com as temperaturas na câmara de combustão na faixa dos 800 a 900 °C.

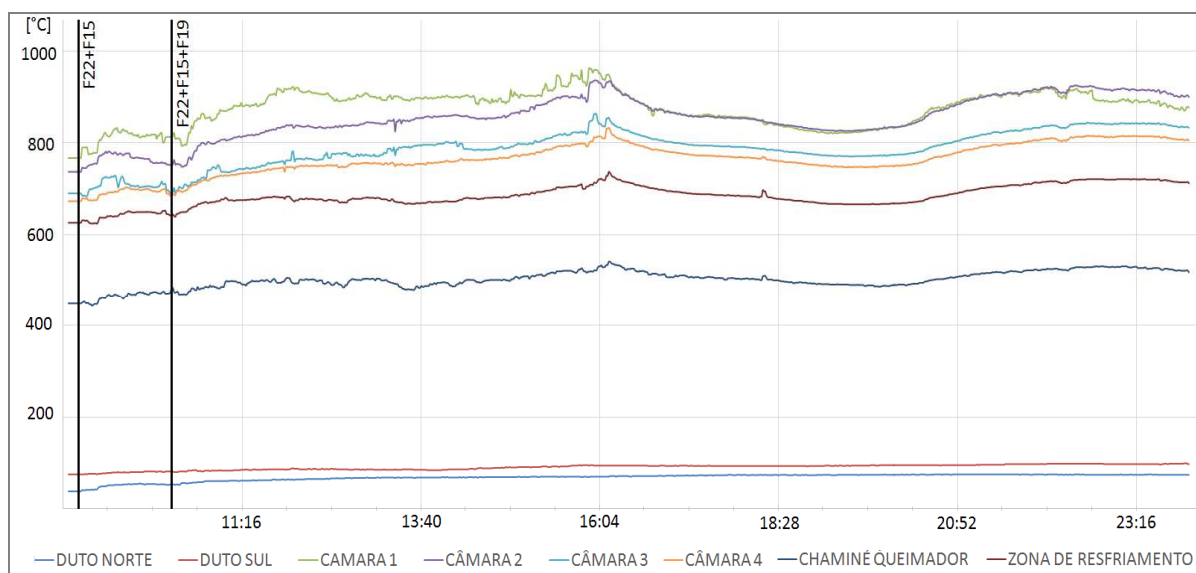


Figura 3.24. Gráfico de temperatura do teste no queimador novo.

Em geral, o novo queimador foi bastante eficiente na combustão dos gases de carbonização, sendo que a queima se manteve por um período de 9 dias ininterruptos com a quantidade de fornos variando de 1 a 5 durante o período, em diferentes fases de carbonização. Durante os testes não houve necessidade de inserção de tiço, a não ser na ignição, sendo que os próprios gases mantiveram a queima constante durante todo o período de teste. A operação do forno se mostrou extremamente simples e segura, sendo que as aberturas de ar tiveram a função de controlar apenas a temperatura na chaminé. Infelizmente, não foi possível coletar amostras de gases durante o teste devido à alta temperatura dos gases e o limite do suportado pelo

analisador. O teste foi interrompido em razão de falhas estruturais no duto Sul, em razão da sinterização térmica dos tijolos no início do duto.

Pode-se concluir que a solução encontrada para queimar por completo o gás de carbonização deve utilizar em conjunto duas estratégias. A primeira consiste em aumentar a concentração de gases combustíveis, e a segunda em elevar sua temperatura, ação que tem a capacidade de abaixar a linha do LII, fazendo com que o gás queime mesmo em baixas concentrações, como será visto com mais detalhe no item 3.4.

A primeira estratégia é atingida ao se misturar gases provenientes de fornos em diferentes estágios de carbonização, ou seja, gases de fornos em estágio avançado de carbonização (com boa concentração de gases combustíveis (H_2 , CO , CH_4) com gases provenientes de fornos em estágio inicial de carbonização (com gases de alta umidade e baixa concentração de gases combustíveis). A segunda estratégia é alcançada pela adoção de grandes queimadores de gás, com amplo volume interno e elevado tempo de residência dos gases em seu interior. Tempo suficiente para que o gás pré-aqueça, atinja a inflamabilidade, queime, e troque calor com o gás frio de entrada, aquecendo-o e gerando um processo autossuficiente, e consequentemente uma combustão constante em seu interior.

Recentemente a adoção destas práticas tem feito com que algumas empresas do setor queimem com boas eficiências os gases de carbonização, entretanto ainda existem desafios relativos ao controle do processo (controle de temperatura, entradas de ar e mistura de gases) e em relação à resistência térmica dos materiais utilizados nos queimadores.

Uma hipótese interessante observado, mas não comprovada, na utilização dos queimadores de grande volume interno é referente a não visualização de chama no interior do equipamento, o que gera a hipótese da existência de situação conhecida como “*flameless combustion*” ou combustão sem chama. Sabe-se que esta situação propicia a não formações de gases poluentes, por oxidar com eficiência os gases combustíveis, diminuindo as emissões de CO , e por ter baixas emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), devido a uniformidade de temperatura. Entretanto, a situação deve ser comprovada em testes futuros, através de medições que descrevam a composição e a temperatura no interior do equipamento

Os óxidos de nitrogênio passam a ser formados em grandes concentrações a partir de altas temperaturas, principalmente acima dos $1500\text{ }^{\circ}C$. Como os queimadores trabalham em baixas temperaturas ($800\text{-}1000^{\circ}C$), a formação de NO_x poderá ser evitada. Uma combustão sem chama é favorável para reduzir os NO_x por não gerar gradientes temperatura na combustão, como ocorre nas queimas convencionais com chama. Entretanto, esta hipótese foi baseada

apenas em uma análise visual, e futuramente serão necessários medições de temperatura, e composição para comprovar a situação cientificamente.

Não foram reportadas concentrações de enxofre nos gases de carbonização e, portanto, não deve ocorrer a formação de SOx. Como as cinzas e a maior parte do carbono fica no carvão vegetal a geração de particulados pode ser pequena, assim como problemas relacionados à sinterização, entretanto, não foram realizadas medições destes poluentes que possam comprovar esta hipótese.

Ainda existe uma série de empecilhos que devem ser ultrapassados para conseguir obter energia através da combustão dos gases da carbonização, entretanto, pode-se dizer que as principais barreiras relacionadas a combustão estão sendo compreendidos e superados. Neste momento, diversas empresas do setor estão trabalhando nestas questões, e é possível que nos próximos anos surjam aprimoramentos tecnológicos capazes de tornar a combustão dos gases da carbonização constante e eficiente, de modo que sua energia possa ser convertida e aproveitada de diversas maneiras, entre elas para produção de eletricidade limpa e renovável.

3.4. Inflamabilidade dos Gases de Carbonização

Quando o objetivo é gerar energia a partir dos gases de carbonização da madeira, em princípio, deverá se recorrer a sua combustão como meio primário de conversão energética. Portanto, se torna essencial estudar sua inflamabilidade, e consequentemente os aspectos relacionados à queima dos gases.

Pelos resultados e análises apresentados nos itens anteriores, fica claro que a temperatura e a concentração de inertes são os pontos chave relacionados ao problema. Portanto, nesta seção pretende-se avaliar a relação destes fatores através de métodos matemáticos capazes de prever a inflamabilidade de misturas combustíveis.

Normalmente, os limites de inflamabilidade disponíveis na literatura estão limitados a medições realizadas com apenas uma ou duas espécies combustíveis em relação ao ar ou oxigênio. Entretanto, os gases de carbonização compreendem uma mistura de gases inertes (CO₂, H₂O e N₂) e combustíveis (CH₄, H₂, CO e GC). A equação de Le Chatelier's (Eq. 3.15, no item 3.1.1) pode ser utilizada para estimar a inflamabilidade de uma mistura de combustíveis, entretanto, ela não é aplicável para misturas contendo inertes ou com conteúdo extra de oxigênio (ZHAO, 2011).

Atualmente, o método profissionalmente aceito para avaliar a inflamabilidade de misturas com múltiplos combustíveis e inertes é disponibilizado pela norma ISO 10156 (ISO, 2010). O método utiliza um dado de inflamabilidade, chamado de índice limite de ignição (Tci), que expressa a quantidade máxima de gás combustível que, quando diluído ao nitrogênio, não é inflamável no ar.

Apesar de semelhantes, este valor é diferente do limite inferior de inflamabilidade, pois, seu cálculo considera a inflamabilidade da mistura binária combustível e nitrogênio que, ao se misturar com o ar, pode ou não se tornar inflamável. Entretanto, seus valores podem ser correlacionados através de um diagrama ternário entre o combustível, nitrogênio e o oxigênio (ou ar), a exemplo da curva para o metano na Figura 3.25.

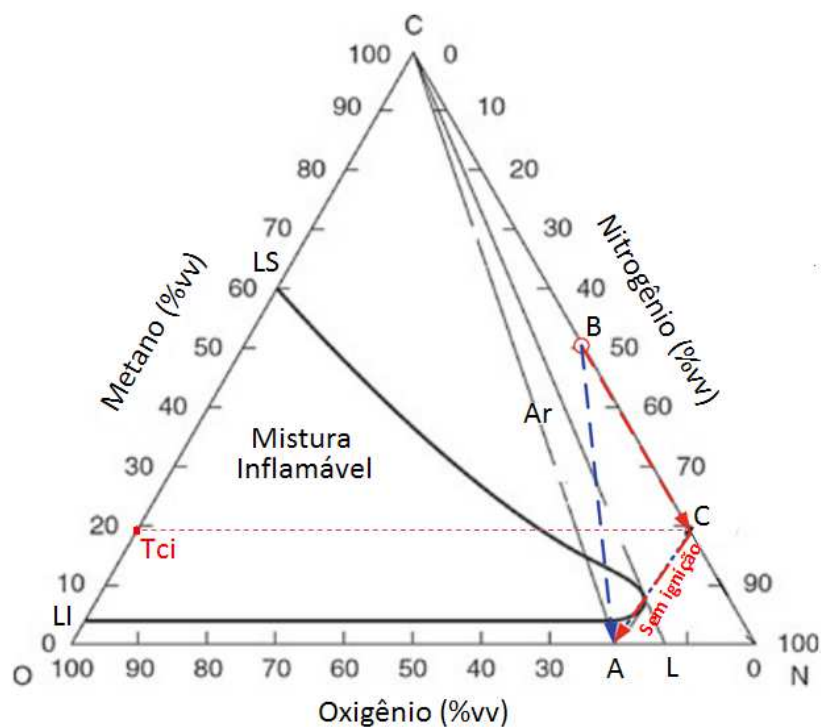


Figura 3.25. Diagrama ternário de inflamabilidade do metano com o oxigênio e o nitrogênio em condição ambiente (TINGGUANG, 2015).

A diluição inicial, mostrada no ponto B, se liberada ao ar, encontrara seu estado final no ponto A, como ar puro. Como a linha AB cruza a zona de inflamabilidade existe, portanto, a possibilidade de queima da mistura se em contato com uma fonte de ignição. Para evitar que a mistura cruze esta zona, a mistura pode ser diluída com nitrogênio do ponto B para o C, criando um novo caminho de diluição com o ar (CA), que não passa pela zona de inflamabilidade, gerando, conseqüentemente, uma mistura que não é inflamável no ar. A

concentração de combustível no ponto C corresponde ao Tci do combustível nas condições pré-estabelecidas de pressão e temperatura.

Para estimar a influência de outros inertes, que não o nitrogênio, a norma utiliza uma versão modificada da equação de Le Chatelier's, descrita primeiramente por Besnard (1996), onde é utilizado um fator de equivalência K em relação ao nitrogênio para as combinações de inertes em uma mistura, o qual é calculado com base nas diferenças de propriedades termofísicas (calores específicos) e testes laboratoriais entre gases e inertes e combustíveis, estes valores são tabelados e podem ser encontrados na norma ISO 10156 e em outras publicações (Molnarne et al., 2005). Usando a Eq. 3.16, segundo a ISO 10156, os gases são classificados como inflamáveis quando preenchem a condição:

$$\sum_{i=1}^{IF} F_i \left(\frac{100}{T_{ci}} - 1 \right) \geq \sum_{k=1}^{IN} B_k K N_k \quad (3.16)$$

Onde:

F_i Fração do componente inflamável i na mistura em mol%

IF número de componentes inflamáveis

B_k Fração molar do componente inerte k na mistura em mol%

IN Número de componentes inertes

KN_k Coeficiente de equivalência com o nitrogênio do componente inerte k

T_{ci} Índice limite de ignição do componente inflamável i

O significado físico da Eq. 3.16 é que a quantidade de diluente inerte, no lado esquerdo, deve ser menor que a quantidade de nitrogênio equivalente, no lado direito, para que a mistura seja não inflamável. Com a equação descrita anteriormente e os dados sobre a composição dos gases de carbonização obtidos no APÊNDICE I, pode-se analisar a inflamabilidade dos gases para as diferentes corridas (análises) realizadas nos fornos retangulares. Para simplificação, foi utilizado um fator de ponderação nos cálculos para que o lado esquerdo da equação fosse sempre igual a 1, assim, um valor de Tci equivalente da mistura menor que 1 denota que a mistura não é inflamável nestas condições, do contrário a mistura é inflamável. Estes resultados são mostrados na Figura 3.26.

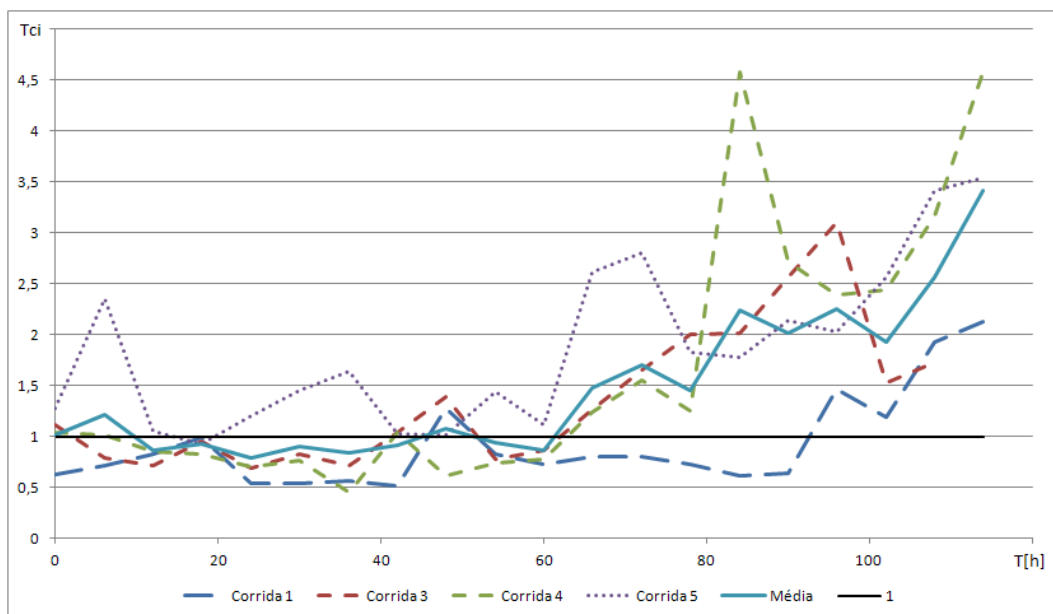


Figura 3.26. Resultados dos cálculos do índice limite de ignição (Tci) para os gases de carbonização em fornos retangulares, com a metodologia ISO 10156.

Pode-se notar na Figura 3.27 que no início da carbonização, até aproximadamente a hora 60, os gases possuem pouca ou nenhuma inflamabilidade, com exceção da corrida 5. A corrida 1 apresentou os piores resultados, provavelmente em função da alta umidade da madeira usada na análise (Os dados das corridas podem ser encontrados no APÊNDICE I, ou na Tabela 4.2 no próximo capítulo). Já a partir da hora 60 os gases apresentam melhores resultados, com exceção novamente da corrida 1.

Os cálculos feitos através da Eq. 3.17 não levam em consideração a quantidade de oxigênio e nitrogênio na mistura, portanto, se ao sair do forno de carbonização os gases forem diluídos por ar, antes de encontrar o ponto de ignição no queimador, eles podem perder a inflamabilidade. É importante salientar que o resultado do Tci da mistura mostra apenas que ela, ao se diluir gradativamente com o ar, pode encontrar um ponto neste caminho onde é possível sua queima.

Infelizmente, os dados de Tci e K_k são estabelecidos na norma ISO e na literatura apenas nas condições ambiente de pressão e temperatura, e não foram encontradas relações capazes de definir sua dependência em relação a estes parâmetros. Porém, os gases de carbonização deixam os fornos a temperaturas mais altas, em média a 67 °C ao chegar ao queimador. Assim, deve-se considerar que os reais limites de ignição dos gases são inferiores ao calculado por este método.

Um outro método para estimar a inflamabilidade de misturas combustíveis tem sua base em 1911, quando Burgess e Wheeler (1911) notaram que a temperatura de chama adiabática (TAC) no LII era uma constante, notadamente em torno de 1600 K (+/- 150 K) para diversos hidrocarbonetos, com exceção do hidrogênio, 980 K, monóxido de carbono, 1300 K e do acetileno, 1280 K. Estes resultados indicavam que a TAC no LII era um indicativo da reatividade do combustível. Posteriormente, foi demonstrado que este valor é relativamente sensível à adição de diluentes e à temperatura inicial da mistura (Hurley, 2016). Devido a esta característica da TAC no LII, ela tem sido utilizada para prever com sucesso os efeitos de temperatura e diluição de inertes sobre os limites de inflamabilidade de misturas (Dwyer et al., 2003; Vidal et al., 2006; Tingguang, 2015).

Parte-se do princípio que a TAC é uma medida da energia de uma mistura onde, no LII, encontra-se o estado mínimo de energia requerido para que a queima possa se propagar, sendo que este valor é utilizado como referência para estimar se uma possível mistura com inertes ou em diferentes temperaturas é ou não inflamável. Assim, emprega-se o critério descrito na Eq. 3.17:

$$\text{se } TAC_{\text{mistura}(T_i)} > TAC_{\text{referência}} \rightarrow \text{a mistura é inflamável} \quad (3.17)$$

em que,

$TAC_{\text{mistura}(T_i)}$ = temperatura de chama adiabática da mistura combustível-ar-inertes na temperatura inicial T_i , e;

$TAC_{\text{referência}}$ = temperatura adiabática da de chama da mistura combustível-ar no LII à temperatura inicial de referência.

Se a resposta à Eq. 3.18 for verdadeira, considera-se que a mistura possui energia suficiente para estar acima do LII.

Esta ferramenta pode ser utilizada para determinar a inflamabilidade dos gases não condensáveis a diferentes temperaturas e adição de inertes, sendo possível, ainda, estimar o nível de pré-aquecimento necessário para elevar a temperatura da mistura até que a Eq. 3.18 se verifique. Portanto, esta teoria compensa automaticamente os efeitos relativos a mudanças de temperatura e a adição de inertes. Por exemplo, para o metano (LII igual a 5% no ar) se a temperatura aumenta de 20°C para 150 °C, a TAC de referência permanece a mesma, 1200 K,

e o LII da mistura cai para 4,5%, pois o aumento de temperatura significa menor energia para atingir a TAC de referência.

Partindo da Eq. 3.18, pode-se obter a Eq. 3.18:

$$\text{se } \frac{TAC_{\text{mistura}(T_i)}}{TAC_{\text{referência}}} > 1 \rightarrow \text{a mistura é inflamável} \quad (3.18)$$

A TAC pode ser encontrada através da Eq. 3.9 com os valores de referência de entalpia dos componentes, calculadas através de funções de partição em função da temperatura, mostradas no próximo capítulo (Eq. 4.14, 4.15 e 4.16) (McBride e Gordon, 1992). A Eq. 3.19 foi aplicada para as corridas realizadas nos fornos retangulares e para diferentes temperaturas iniciais da mistura, 67, 250 e 450 °C, como mostram as Figuras 3.27, 3.28 e 3.29, onde no eixo y se encontram os resultados da Eq. 3.19.

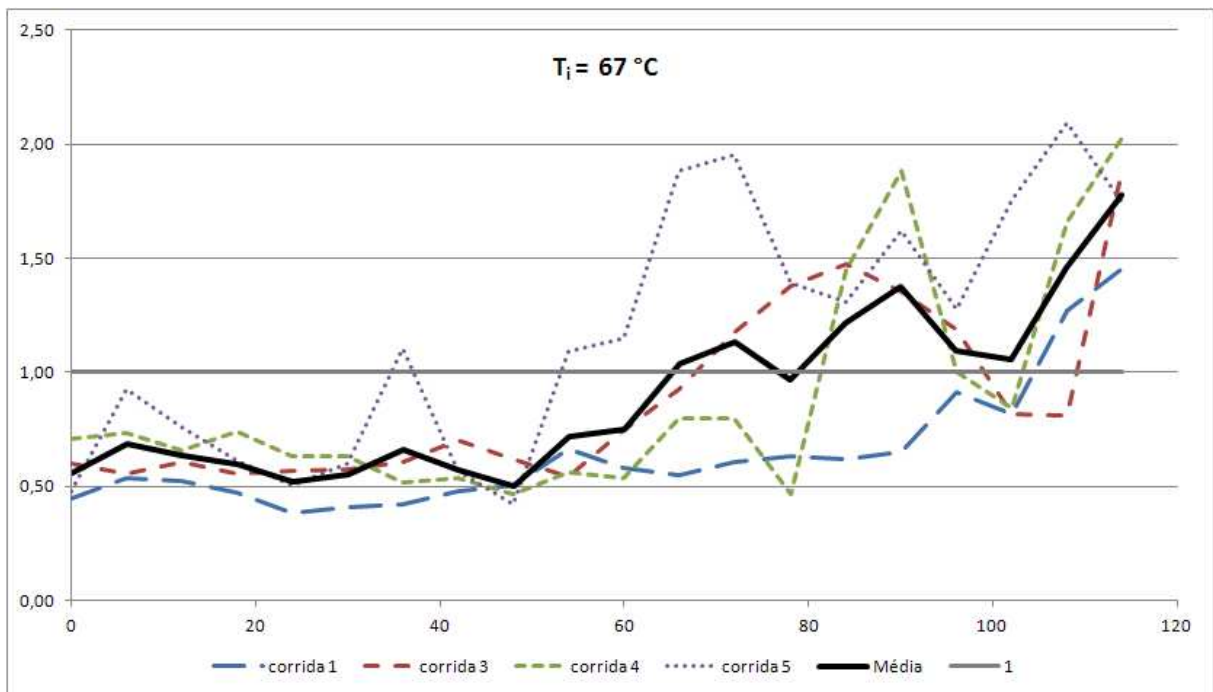


Figura 3.27. Resultados dos cálculos de inflamabilidade para os gases de carbonização em fornos retangulares, com a metodologia da temperatura de chama adiabática ($T_i = 67^\circ\text{C}$)

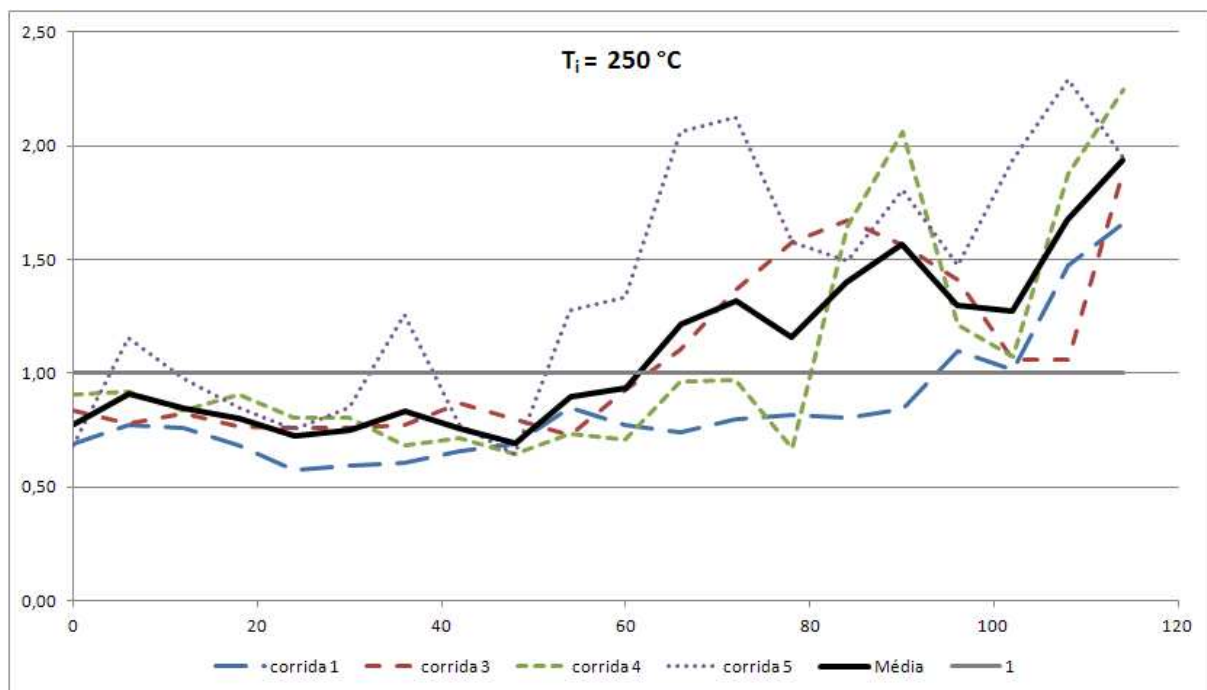


Figura 3.28. Resultados dos cálculos de inflamabilidade para os gases de carbonização em fornos retangulares, com a metodologia da temperatura de chama adiabática ($T_i = 250\text{ °C}$)

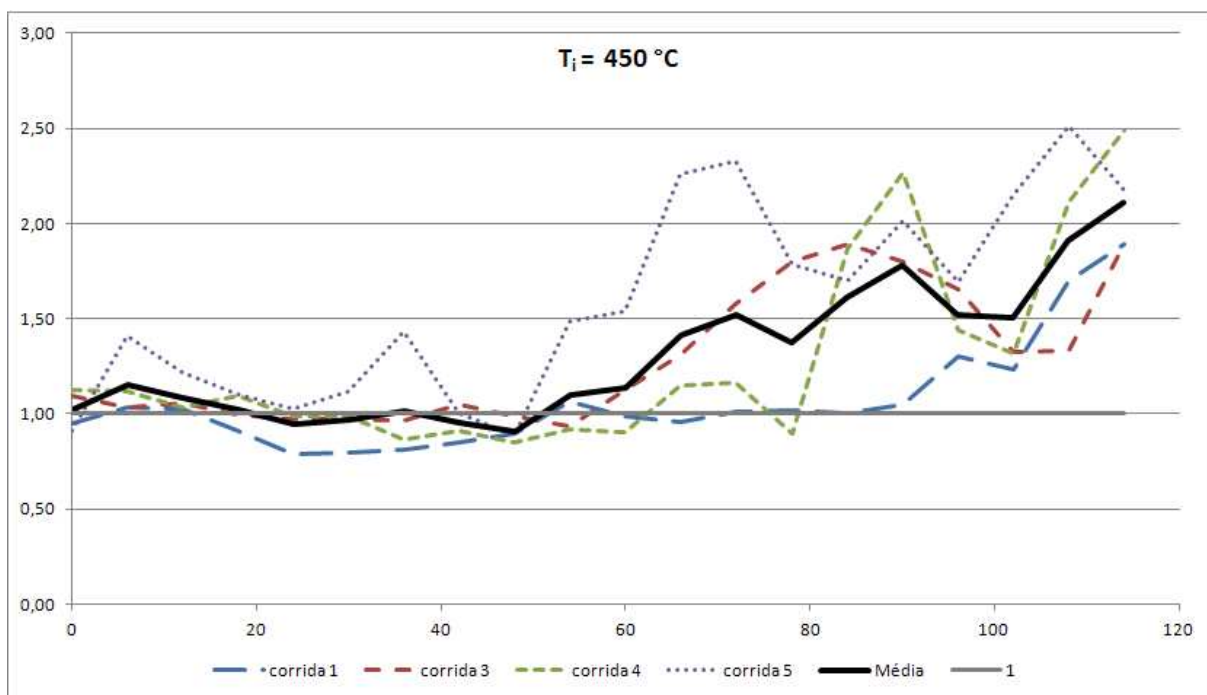


Figura 3.29. Resultados dos cálculos de inflamabilidade para os gases de carbonização em fornos retangulares, com a metodologia da temperatura de chama adiabática ($T_i = 450\text{ °C}$)

Os resultados mostram claramente que na parte inicial da carbonização, antes da hora 60, os gases se apresentam abaixo do LII nas temperaturas de 67 e 250 °C , com exceção da corrida

5. Já a 450 °C os gases iniciais se apresentam mais próximos do LII. A situação mais crítica, com menor inflamabilidade, ocorre na corrida 1 com T_i igual a 67°C próximo a hora 24, sendo que neste caso é preciso pré-aquecer a mistura até 650 °C para que ela atinja o LII, usando a Eq. 3.19.

Os resultados mostram-se coerentes com o que foi observado no segundo queimador central da Plantar, onde os gases foram queimados com sucesso mesmo nas piores situações de inflamabilidade, quando se trabalhava com apenas 1 forno em início da carbonização conectado ao queimador pré-aquecido. Sendo a temperatura mínima apresentada pelo queimador de 800 °C, ela seria suficiente para pré-aquecer os gases até 650 °C e fazer com que eles atinjam a inflamabilidade na pior situação avaliada. Também, isto é condizente ao observado no queimador do projeto Arcelor/Cemig, onde estipulou-se a temperatura mínima necessária de 600 °C de ignição no equipamento (ver Item 3.2).

Em comparação com os resultados da metodologia da ISO 10156, os cálculos com a TAC apresentaram menor inflamabilidade, isto ocorre porque o último método leva em consideração a diluição dos gases da carbonização com o ar, o que não acontece no método da ISO, sendo mais restritivo, pois, se negativo, mostra que os gases são não inflamáveis mesmos retirando todo o ar de diluição.

Na prática, não foram encontrados dados experimentais obtidos em laboratório, sobre a inflamabilidade dos gases de carbonização gerados em fornos retangulares. Os métodos de cálculo aqui descritos são ferramentas para se avaliar e tomar decisões sobre a inflamabilidade na falta de dados experimentais. Além do mais, os métodos possuem limitações, pois consideram situações ideais, como pressão constante, ausência de reações de pré-combustão, e cinética da combustão das espécies independente das outras espécies de combustíveis.

CAPÍTULO 4. POTENCIAL ENERGÉTICO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO GERADOS EM FORNOS RETANGULARES

4.1. Balanço de Massa e Energia.

4.2. Funcionamento do Sistema em *Cluster* e Determinação do Potencial Energético.

4.3. Avaliação das Tecnologias de Conversão Energética.

As análises realizadas neste capítulo são baseadas nas medições de emissões realizadas pelos Laboratórios Integrados de Química, Celulose e Energia, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (LQCE/ESALQ/USP), nos fornos retangulares da Plantar Energética, localizados na UC Itacambira. Os dados completos da metodologia utilizada e os resultados obtidos podem ser visualizados no APÊNDICE I. O autor não participou desta coleta de dados

Em resumo, o gás de carbonização foi coletado e imediatamente analisado no local, por cromatografia gasosa, enquanto amostras da fração condensável foram coletadas e armazenadas para posterior análise da sua composição química, por meio de cromatografia gasosa acoplada a espectrômetro de massa. A amostragem foi realizada nas chaminés dos fornos, coletando-se os gases durante todo o processo de carbonização.

O trabalho envolveu a determinação direta do poder calorífico, por calorimetria, de amostras da madeira enfornada, do carvão vegetal produzido e do alcatrão coletado. Para a amostragem do gás de carbonização, foram realizadas 6 corridas de carbonização, sendo amostrados os gases liberados nas duas chaminés dos fornos. A Tabela 4.1 resume a sistemática de avaliação aplicada na obtenção de dados realizadas pela equipe do LQCE.

A amostragem foi realizada nas duas chaminés do forno, com a coleta e análise dos gases de uma fornada por semana (duração de 5 dias de coleta). Convencionou-se não realizar medições nas primeiras horas de carbonização, em função dos gases emanados no período inicial do processo serem predominantemente compostos por água, não oferecendo, portanto,

bom potencial energético. A amostragem foi iniciada a partir do momento em que a chaminé iniciou a tiragem dos gases, mantendo-se o procedimento padrão de carbonização da empresa.

Tabela 4.1. Sistemática de avaliação aplicada na coleta de dados (com base em 6 fornadas).

	Componente				
	Madeira	Carvão	GNC	GC	Alcatrão
Calorimetria	6 amostras	6 amostras	**	***	Amostra composta a cada 24 h
Espectrometria de massa	---	---	---	Amostra composta a cada 24 h	---
Cromatografia gasosa	---	---	Amostra a cada 6 h	---	---
Pesagem	6 amostras	6 amostras	‡	Amostra a cada 6 h	Amostra composta a cada 24 h

** Determinação por meio de balanço de massa e poderes caloríficos, disponíveis na literatura, de cada componente não-condensável

*** Calculado por meio do balanço de massa e energia

‡ Determinação da massa por meio de cromatografia gasosa

Lembra-se que o alcatrão está contido na fração de GC. As coletas foram programadas para serem realizadas em 6 ciclos de amostragem com duração de 10 minutos por hora, a uma taxa de 1,5 L/minuto. O gás coletado de cada ciclo de 6 horas foi armazenado em gasômetros com capacidade de 60 L.

A cada intervalo de 6 horas (correspondendo a 6 ciclos de amostragem com duração de 10 minutos), uma amostra da fração não condensável contida no gasômetro foi coletada em bolsas de Tedlar. Neste período, procedeu-se também à limpeza e substituição da vidraria e dos filtros. A análise química dos gases não condensáveis amostrados foi então conduzida por meio de um cromatógrafo gasoso equipado com detector de condutividade térmica.

Todos os procedimentos foram conduzidos de acordo com a norma UNFCCC AM0041 (UNFCCC, 2006). Esta norma é aprovada e registrada para projetos do MDL da Convenção do Clima. Com os dados obtidos das 4 corridas válidas, calculou-se a produção média de gases de um forno retangular, apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Produção média de gases de carbonização em um forno retangular da UC Itacambira.

	Madeira Seca	Madeira Úmida	Umidade Madeira (b.u.)	Carvão Úmido	Umidade Carvão (b.u.)	RG (b.u.)	Tiço	GT	GNC	GC	Tempo
	kg	kg	%	kg	%	%	kg	kg	kg	kg	hr
Corrida 1	150.058	218.240	31,2	45.870	4,9	21,0	6.040	648.235	538.804	109.431	147
Corrida 3	154.686	211.560	26,9	49.200	4,3	23,3	6.810	622.802	530.428	92.373	132
Corrida 4	138.568	190.410	27,2	44.900	3,4	23,6	2.980	556.077	474.646	81.430	133
Corrida 5	160.943	213.270	24,5	51.150	2,6	24,0	2.020	656.447	566.429	90.018	130
Média	151.064	208.370	27,5	47.780	3,8	23,0	4.463	620.890	527.577	93.313	136

b.u. (Base Úmida); GNC (Gases não condensáveis); GC (Gases Condensáveis); GT (Gases totais: GNC+GC); RG (Rendimento Gravimétrico de Carvão).

Tiço é o nome dado à madeira parcialmente carbonizada, portanto, produto que não foi totalmente carbonizado pelo forno, consistindo em um subproduto do processo.

Nota-se que a madeira de maior umidade (40%, na corrida 1) resultou no pior rendimento gravimétrico (21%), no maior tempo de carbonização e em alta geração de tico, evidenciando a importância de se trabalhar com madeira de baixa umidade. Informações não obtidas nas análises, como as dimensões da madeira (fato abordado no Capítulo 2), também interferem nos rendimentos da carbonização, o que pode explicar a diferença entre as corridas. Ainda, outro fator que pode ter influenciado os resultados, é o controle manual do processo, realizado pelo carbonizador (Operador), nas entradas de ar do sistema.

4.1. Balanço de Massa e energia.

Os balanços de massa e energia são uma ferramenta básica no controle de processos produtivos, fundamentados no princípio da conservação de massa e energia, respectivamente.

O primeiro passo ao se efetuar os balanços de massa e energia é definir as fronteiras do sistema a ser avaliado, ou seja, decidir qual parte do processo será estudado e onde ele começa e termina. Neste caso será definido como fronteira do sistema um forno retangular (Figura 4.1).



Figura 4.1. Fronteiras do Sistema utilizadas no Balanço de massa e energia.

Os limites de um sistema aberto (onde existe saída e entrada de massa e energia) são definidos utilizando o termo “volume de controle” (VC). O próximo passo consiste em descobrir as transformações que ocorrem com a massa e a energia no interior do VC. No caso considerado as substâncias que entram no sistema têm dois destinos possíveis: saírem inalteradas ou serem convertidas em outras substâncias.

4.1.1. Balanço de Massa

A lei de Lavoisier, de conservação de massa, determina que em qualquer sistema, físico ou químico, nunca se cria nem se destrói matéria, apenas é possível transformá-la de uma forma em outra. Deste modo tem-se a equação da continuidade (Eq. 4.1):

$$\frac{d_{m_{vc}}}{dt} = \sum m_e - \sum m_s \quad (4.1)$$

Em que,

m_{vc} = massa presente no volume de controle

m_e = massa que entra no volume de controle

m_s = massa que sai do volume de controle

Para volumes de controle quando em regime permanente o balanço de massa pode ser representado pela Eq. 4.2.

$$\sum m_e = \sum m_s \quad (4.2)$$

Para o caso da carbonização da madeira nos fornos retangulares pode-se escrever a Eq. 4.3:

$$m_{\text{madeira}} + m_{\text{ar}} = m_{\text{carvão}} + m_{\text{tiço}} + m_{\text{GC}} + m_{\text{GNC}} \quad (4.3)$$

Em que,

m_{madeira} = massa de madeira enforcada

m_{ar} = massa de ar consumida na carbonização

$m_{\text{carvão}}$ = massa de carvão produzida

$m_{\text{tiço}}$ = massa de tiço produzida

m_{GC} = massa de gases condensáveis produzida

m_{GNC} = massa de gases não condensáveis produzida

De acordo com os dados da Tabela 4.2 e do APÊNDICE I, tem-se que um forno retangular, em média, consome e produz por corrida:

$$m_{\text{madeira}} = 208.370 \text{ kg}$$

$$m_{\text{carvão}} = 47.780 \text{ kg}$$

$$m_{\text{atiço}} = 4.463 \text{ kg}$$

$$m_{\text{GC}} = 93.313 \text{ kg}$$

$$m_{\text{GNC}} = 527.577 \text{ kg}$$

Deste modo, através da Eq. 4.3, estima-se que a massa de ar admitida no processo de carbonização é em média:

$$m_{\text{ar}} = 464.762 \text{ kg}$$

Resumindo, os resultados do Balanço de massa, são apresentados na Figura 4.2.



Figura 4.2. Resultados do balanço de massa para um forno retangular

A Tabela 4.3 mostra o resultado do balanço de massa para cada corrida individualmente e para a média.

Tabela 4.3. Resultados do balanço de massa nos fornos retangulares.

	Entrada		Saída			
	m_{Madeira}	m_{AR}	$m_{\text{Carvão}}$	$m_{\text{Tiço}}$	m_{GNC}	m_{GC}
Corrida 1	218.240	481.905	45.870	6.040	538.804	109.431
	31%	69%	7%	1%	77%	16%
Corrida 3	211.560	467.252	49.200	6.810	530.428	92.373
	31%	69%	7%	1%	78%	14%
Corrida 4	190.410	413.547	44.900	2.980	474.646	81.430
	32%	68%	7%	0%	79%	13%
Corrida 5	213.270	496.347	51.150	2.020	566.429	90.018
	30%	70%	7%	0%	80%	13%
Média	208.370	464.762	47.780	4.463	527.577	93.313
	31%	69%	7%	1%	78%	14%

Neste ponto é importante avaliar a relação ar-combustível do processo de carbonização da madeira de eucalipto, pois, tratando-se de uma pirólise, este deve estar, no mínimo, abaixo da quantidade de ar estequiométrica da reação de combustão. Para isto, foi adotada a composição elementar do eucalipto determinada por Carneiro et al. (2012a), de acordo com a Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Análise elementar da madeira de eucalipto (Carneiro et al., 2012a).

	N	C	H	S	O
Madeira	1,40%	48,00%	5,00%	0,041%	45,50%

A Tabela 4.5 apresenta a reação estequiométrica de combustão de 1000 kg de eucalipto, com a composição mostrada na Tabela 4.4, com o ar.

Tabela 4.5. Reação de combustão estequiométrica para 1000 kg de madeira de eucalipto.

Biomassa					Ar			Produtos				
C	H	O	S	N	+	O ₂	N ₂	→	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	N ₂
39,96	49,61	28,44	0,01	1,00		38,16	143,55		39,96	0,01	24,80	144,05 kmol
480,00	50,00	455,00	0,41	14,00		1221,02	4021,28		1758,78	0,82	446,83	4035,28 kg

Segundo os resultados, é necessário 5.242 kg de ar para a queima estequiométrica de 1000 kg de eucalipto, ou seja, uma relação ar-combustível (AF) de 5,242 de acordo com a Eq. 3.6. Por sua vez, o resultado do balanço de massa mostra um AF de 2,230 (464762 kg Ar / 208370 kg Comb.) evidenciando, portanto, a ocorrência da pirólise.

Entretanto, de fato, a quantidade de ar admitida e gases gerados pelo sistema é um pouco maior do que o valor calculado pelo balanço de massa devido a dois fatores não mensurados. Primeiro, porque o forno de carbonização apresenta, normalmente, vazamentos não contabilizados de GNC e GC nas portas. Segundo, uma vez que o foco das medições foi o conteúdo energético, a equipe responsável pela análise considerou-se que os gases gerados nas primeiras horas de carbonização, durante a ignição, eram de pouca importância do ponto de vista energético e estes não foram coletados e computados.

A medição a cerca dos gases emitidos pela chaminé do forno durante o período de carbonização podem ser observados nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, onde é apresentado a variação mássica horária da produção de GNC e de GC para as corridas da Tabela 4.3.

A Tabela 4.6 mostra o total de cada componente emitido durante a carbonização em valores absolutos e em porcentagem, para as corridas e o resultado médio das carbonizações.

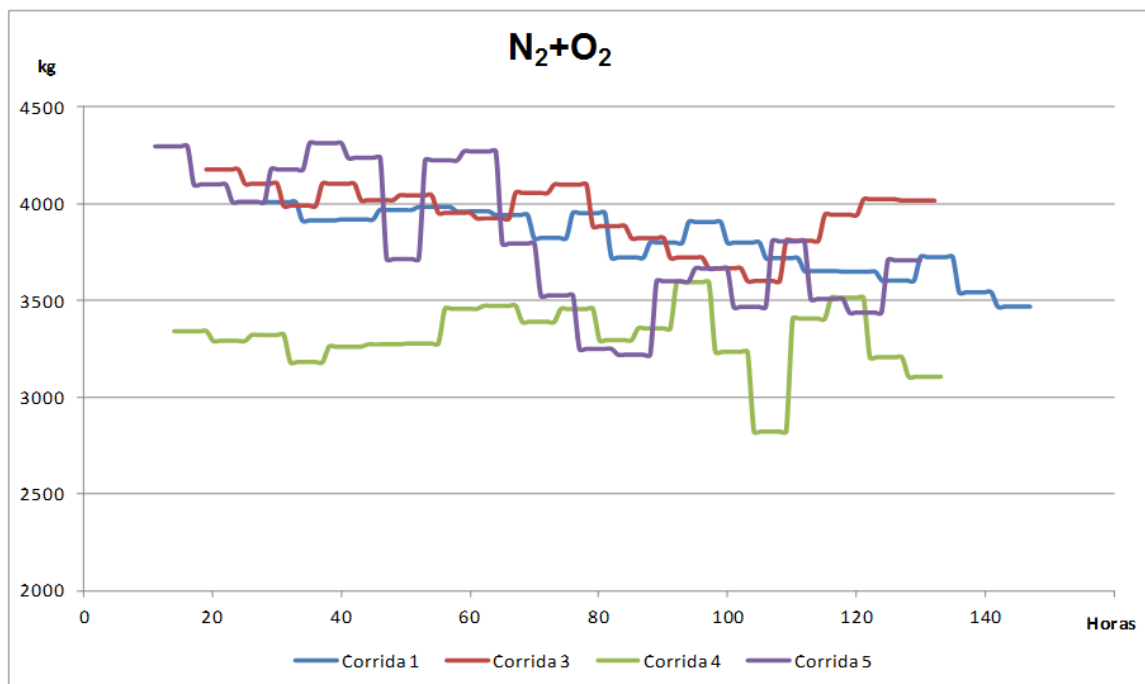


Figura 4.3. Emissão de N_2 e O_2 durante a carbonização nas corridas 1,3,4 e 5.

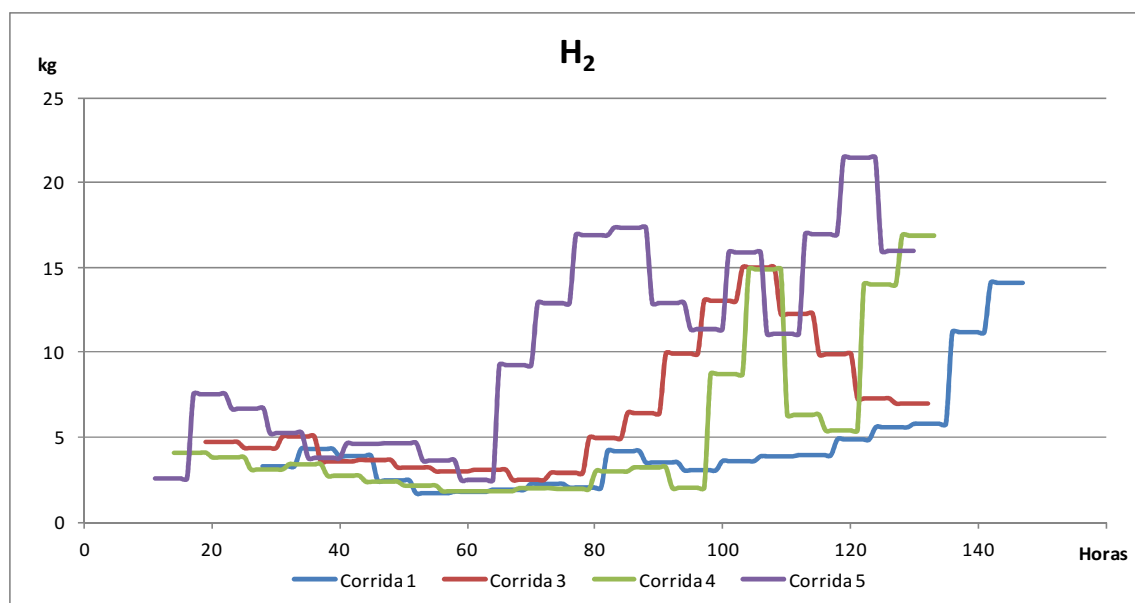


Figura 4.4. Emissão de H_2 durante a carbonização nas corridas 1,3,4 e 5.

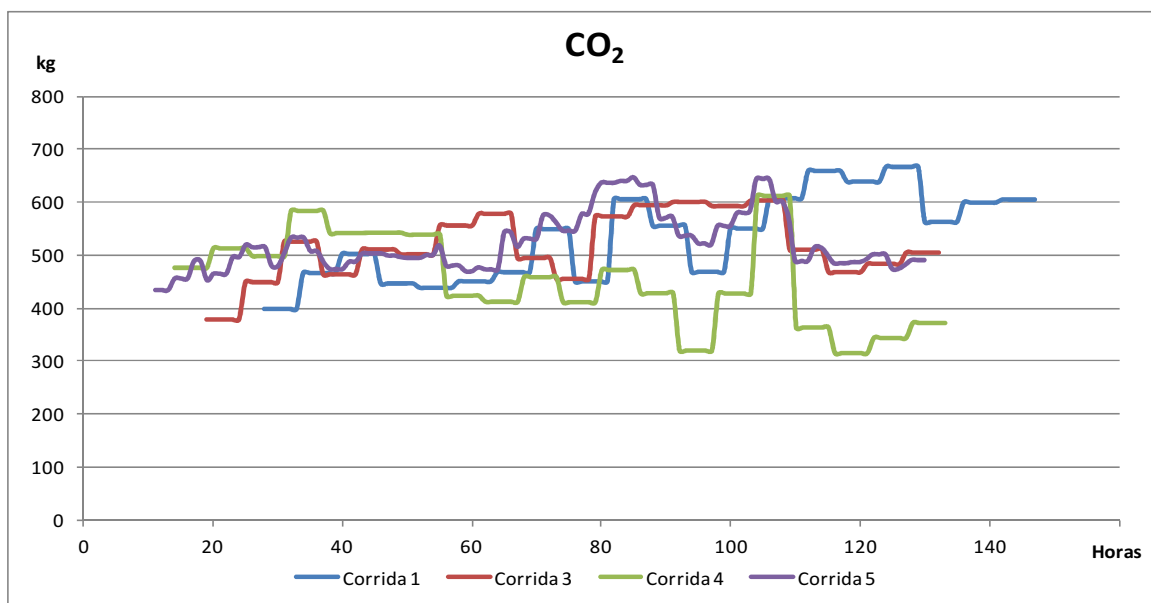


Figura 4.5. Emissão de CO₂ durante a carbonização nas corridas 1,3,4 e 5.

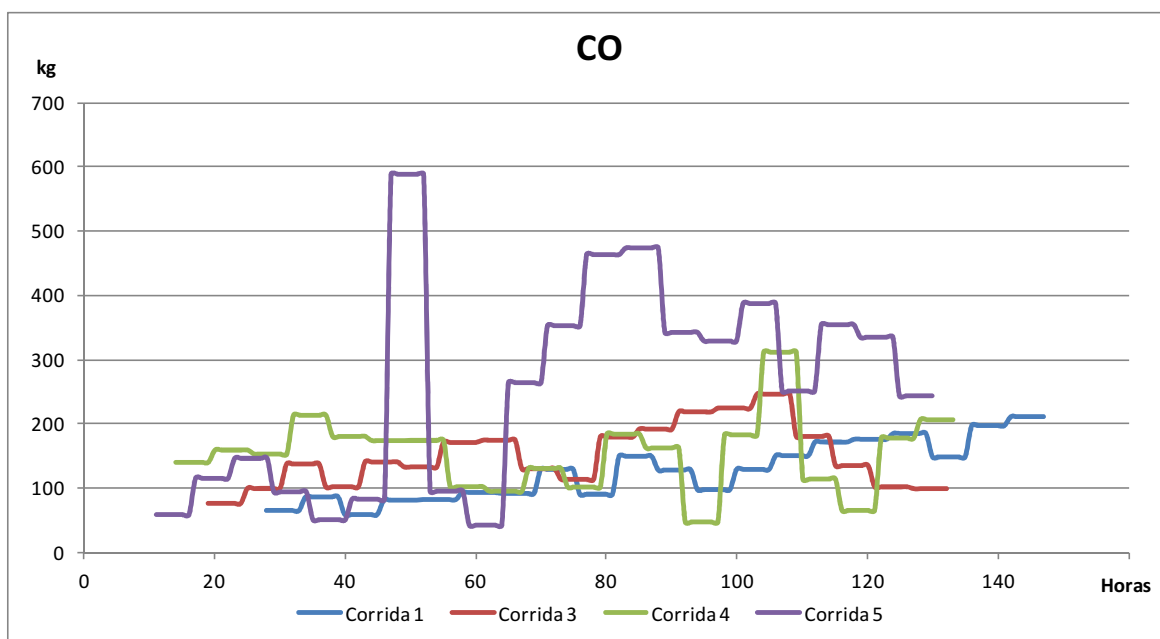


Figura 4.6. Emissão de CO durante a carbonização nas corridas 1,3,4 e 5.

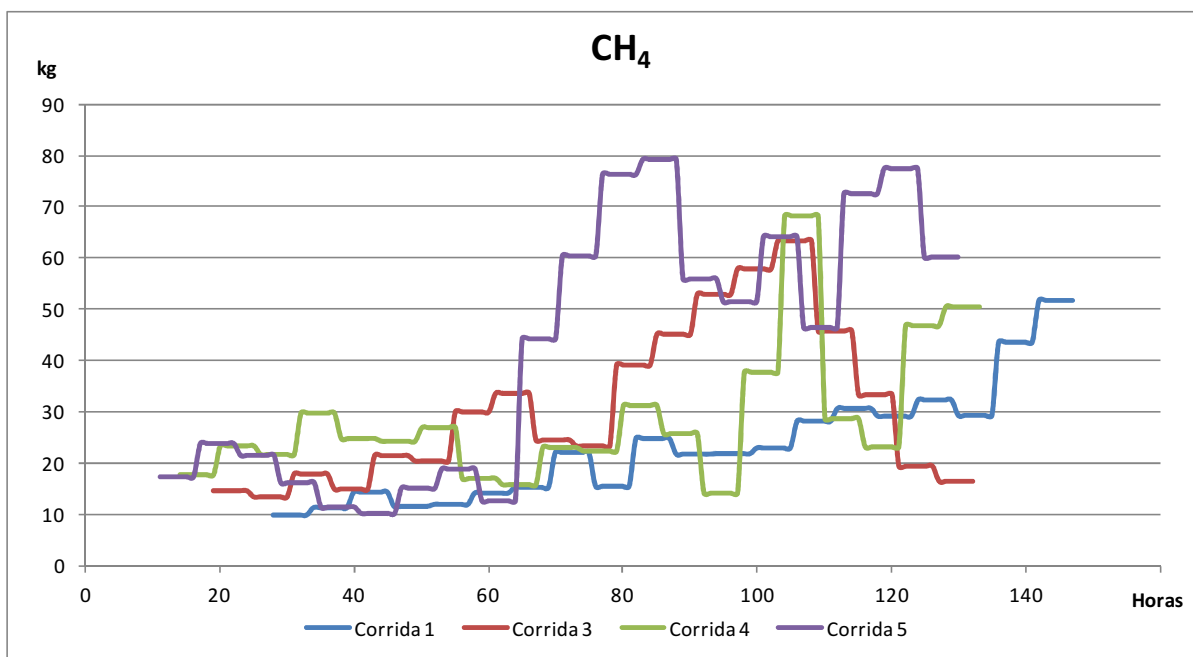


Figura 4.7. Emissão de CH₄ durante a carbonização nas corridas 1, 3, 4 e 5.

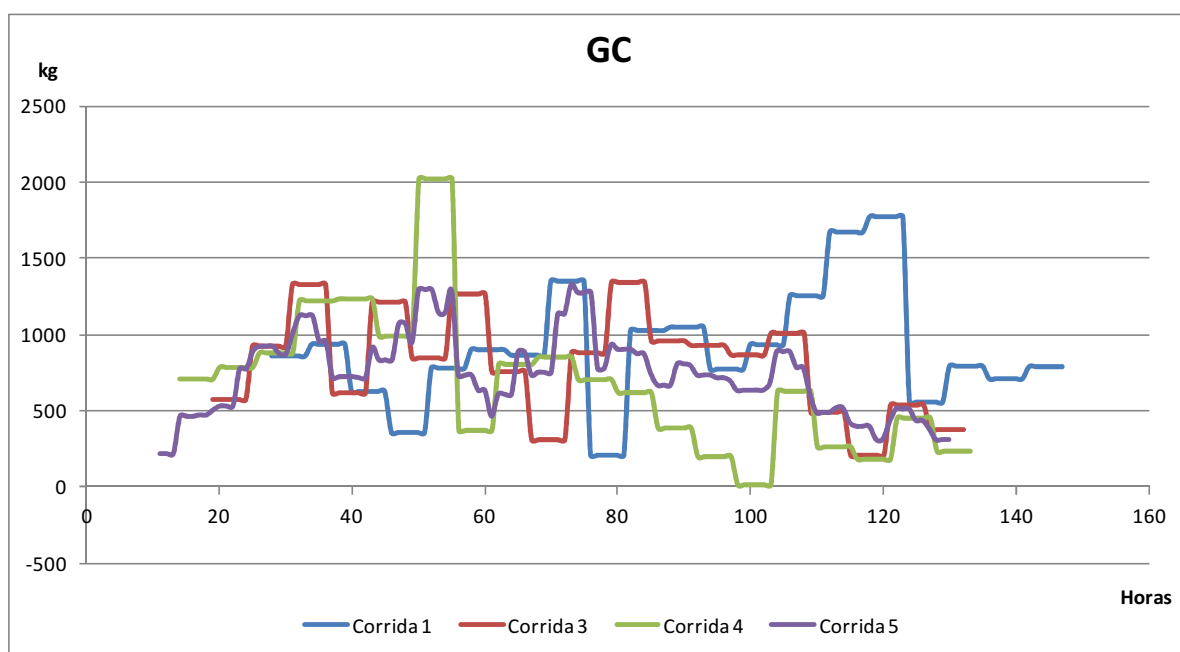


Figura 4.8. Emissão de gases condensáveis durante a carbonização nas corridas 1, 3, 4 e 5.

Tabela 4.6. Soma dos componentes gasosos gerados durante o ciclo de carbonização (Corrida) em valores absolutos e porcentagem.

	m_{GNC}						m_{GC}
	N_2	O_2	H_2	CO_2	CO	CH_4	
Corrida 1	371.053	85.131	526	64.228	15.088	2.778	109.431
	57,2%	13,1%	0,1%	9,9%	2,3%	0,4%	16,9%
Corrida 3	360.038	89.921	731	59.096	17.107	3.535	92.373
	57,8%	14,4%	0,1%	9,5%	2,7%	0,6%	14,8%
Corrida 4	318.274	79.489	625	54.421	18.405	3.432	81.430
	57,2%	14,3%	0,1%	9,8%	3,3%	0,6%	14,6%
Corrida 5	381.529	76.524	1.217	71.662	30.484	5.012	90.018
	58,1%	11,7%	0,2%	10,9%	4,6%	0,8%	13,7%
Média	357.724	82.767	775	62.352	20.271	3.689	93.313
	57,6%	13,3%	0,1%	10,0%	3,3%	0,6%	15,0%

O componente predominante nos gases de carbonização é o nitrogênio que representa, em média, 57,6% dos gases emitidos, seguido dos GC com 15,0%, do O_2 com 13,3%, do CO_2 com 10,0% e o restante dos gases combustíveis CO , CH_4 e H_2 .

Em razão da grande quantidade de O_2 já presente nos gases de carbonização (no ponto de coleta, ou seja, na chaminé dos fornos), faz-se necessário uma avaliação do excesso de ar que será observado no processo de combustão do gás. Deste modo, a Tabela 4.7 apresenta um comparativo entre a quantidade de O_2 estequiométrico ($\text{O}_{2\text{est}}$) requerido para a combustão dos componentes combustíveis emitidos pelo forno (H_2 , CO , CH_4 e GC (fração combustível)) e a quantidade de O_2 já presente na corrente de gás ($\text{O}_{2\text{GNC}}$), ou seja, que constitui os GNC no ponto de coleta, mostrando, com base nestas informações o coeficiente de excesso de ar (λ), calculado de acordo com a Eq. 3.5.

Tabela 4.7. Cálculo do coeficiente de excesso de ar médio para as corridas.

	$\text{O}_{2\text{est}}$	$\text{O}_{2\text{GNC}}$	λ
	[kmol]	[kmol]	
Corrida 1	1.468	3.307	2,3
Corrida 3	1.537	3.262	2,1
Corrida 4	1.448	2.883	2,0
Corrida 5	2.064	3.320	1,6
Média	1.573	3.193	2,0

Nota-se que a quantidade de O_2 e N_2 nos GNC que saem do forno de carbonização é significativa. Estes componentes representam em média 70,94% da massa total de gás emitido, gerando-se um excesso de ar (λ) que varia de 1,6 a 2,3 como mostrou a Tabela 4.7.

Como meio de avaliar a relação entre a quantidade de oxigênio presente nos GNC e a quantidade estequiométrica necessária para a combustão ao decorrer da carbonização, apresenta-se a Figura 4.9, que mostra uma comparação entre o oxigênio requerido para a combustão dos GNC, considerando uma necessidade de 20% de excesso de ar, e a quantidade de oxigênio já presente nos GNC ao longo da corrida 3.

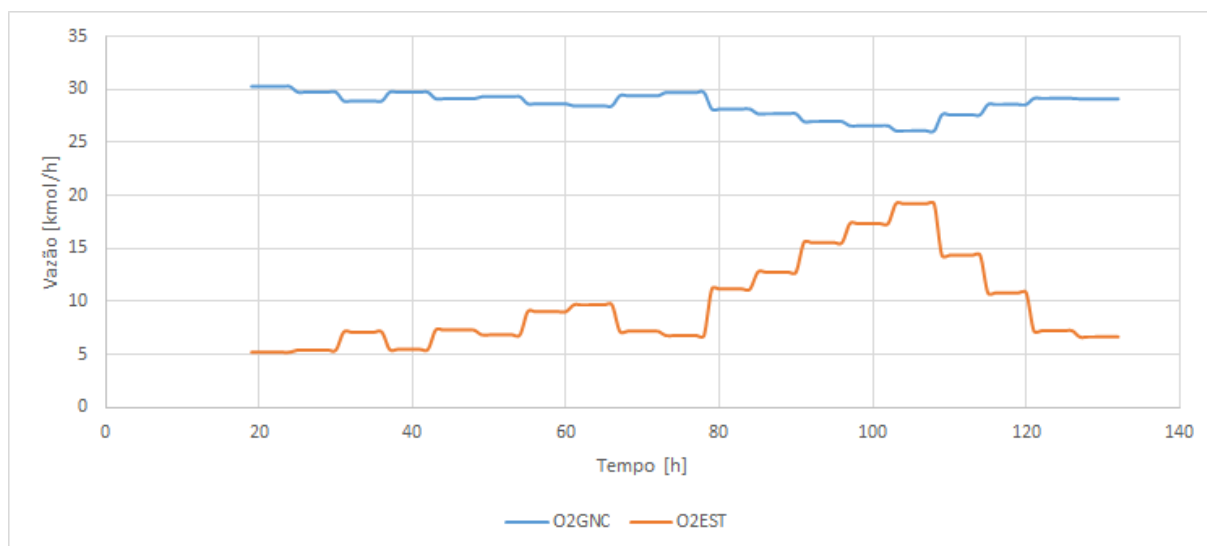


Figura 4.9. Relação entre o oxigênio fornecido e o oxigênio requerido para a combustão dos GNC durante o ciclo de carbonização (Corrida 3).

Nota-se que durante todo o período de carbonização o oxigênio presente no gás de carbonização é superior ao ar estequiométrico requerido para a combustão dos GNC, mesmo considerando uma necessidade de excesso de ar de 20%. Entretanto, nota-se que ao final da carbonização, com o aumento do poder calorífico do gás (como pode ser visualizado pelo aumento na concentração dos gases combustíveis H_2 , CO e CH_4 , nas Figuras 4.4, 4.6 e 4.7, respectivamente), há um aumento significativo no requerimento de oxigênio.

4.1.2. Balanço de Energia

O balanço de energia considera os fluxos de matéria, seu conteúdo de energia, e também os fluxos de energia conhecidos, que entram e saem do sistema.

Sabe-se que a pirólise é um processo termicamente induzido e, portanto, seu início requer calor suficiente para aquecer a biomassa até a temperatura requerida e inicia-lo. Também, uma quantidade significativa de calor é requerida para secar a biomassa antes do início das reações.

Durante a pirólise tem-se reações endotérmicas e exotérmicas, com a variação líquida de entalpia da reação (chamado neste caso de calor de pirólise) podendo ser negativa ou positiva, o que depende fortemente das características do insumo a ser pirolisado e das condições do processo, sendo que os fatores que aumentam a produção de carvão, característicos da pirólise lenta, tendem a resultar num processo global mais exotérmico, devido, principalmente, ao aumento das reações secundárias exotérmicas que geram carvão. Estas reações secundárias afetam significativamente os efeitos térmicos globais do processo, e podem muda-lo de endotérmico para exotérmico se for dado tempo de contato suficiente entre os voláteis e o carvão primário em faixas de temperatura adequadas (Gomez et al., 2009; Prakash e Karunanithi, 2009; Sinha et al., 2000; Nachenius et al., 2013).

Entre os valores encontrados na literatura para o calor de pirólise da madeira, observa-se uma grande discrepância de valores em termos de magnitude, sendo também endotérmicos ou exotérmicos. Suuberg et al. (1994) Boonmee (2004) sugeriu um valor endotérmico de 70 a 400 kJ/kg, dependendo da produtividade do carvão. Roberts (1970) Boonmee (2004), encontrou um valor exotérmico de 192 kJ/kg, devido ao papel das reações que envolvem a decomposição da lignina em voláteis e carvão. Ratha et al. (2003) dividem a pirólise em uma primeira fase endotérmica (200 °C a 390 °C) e uma segunda fase exotérmica (390 °C a 500 °C), encontrando um calor de pirólise endotérmico de 122 kJ/kg para a madeira (Boonmee, 2004).

De modo geral, acredita-se que o aumento no tempo de residência ou da concentração dos vapores na zona de reação com o carvão primário irá beneficiar a formação de carvão e consequentemente tornando a reação mais exotérmica. De fato, alguns estudos reportaram uma relação linear entre o calor de pirólise e o rendimento de carvão de 2,0 a 3,5 MJ/kg de carvão formado (Di Blasi, 2008). Também, é geralmente aceito que o processo de decomposição da lignina é exotérmico e o da celulose é endotérmico. Considerando as incertezas relacionadas se a pirólise da biomassa é exotérmica ou endotérmica, pode-se

considerar esta energia como pequena frente aos outros fluxos energéticos do sistema e ela pode ser desconsiderada para simplificação, como sugerido por vários autores (Paker et al., 1985; Di Blasi, 1994; Atreya, 1998). Di Blasi (2008) sugere que devido ao maior rendimento de carvão da biomassa em comparação ao da celulose isoladamente, os efeitos positivos e negativos dos calores de reação tendem a ser equivalentes.

Portanto, os fluxos internos de energia na carbonização podem mudar de maneira significativa de acordo com o tipo de reator utilizado, a severidade do processo (taxa de aquecimento e temperatura de pirólise) e é difícil ter uma estimativa precisa da energia consumida durante a carbonização dentro de um forno retangular. Alguns estudos tentaram avaliar a energia requerida para a carbonização como uma medida da fração do poder calorífico do insumo a ser carbonizado (Nowakowski et al., 2010; Daugaard e Brown, 2003; Gronnow et al., 2013; Yang et al., 2013). Dentre estes estudos, a menor energia requerida no processo de pirólise foi calculada por Gronnow et al. (2013), que encontraram um valor corresponde a 6% do PCS da biomassa de entrada, ou 1,17 MJ/kg. Já Nowakowski et al. (2010) propuseram um valor maior em 15%, porém estes estudos consideram também a demanda de energia necessária para a secagem da madeira (Crombie et al, 2014).

Os estudos mostrados anteriormente dividem a pirólise em um ou diversos subsistemas (ou VCs), os quais representam uma ou mais etapas do processo, sendo eles negativos ou positivos em termos de energia, e considera-se um intercâmbio de energia entre eles e entre o ambiente externo. Por exemplo, se a pirólise for endotérmica, energia virá parcialmente de processos exotérmicos internos, de fora do sistema, ou por meio da combustão do próprio insumo a ser carbonizado.

A análise aqui realizada considera como VC todo o forno de carbonização, em um processo sem a geração de trabalho e onde toda energia deixa o sistema após a finalização do processo de carbonização. Deste modo, qualquer energia consumida ou liberada durante as reações de pirólise e combustão no interior do forno de carbonização será incorporada aos produtos da reação e aos outros fluxos energéticos, fechando o balanço de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica. Assim, se torna desnecessário para este tipo de análise definir o calor de pirólise no interior do forno retangular, não importando a dinâmica dos fluxos internos de energia, mas sim os estados inicial dos insumos e final dos produtos.

O princípio da conservação de energia (Primeira Lei da Termodinâmica) aplicado ao processo é representado pela diferença do somatório das energias das entradas e saídas. Assim, tem-se a Eq. 4.4:

$$\sum E_e = \sum E_s \quad (4.4)$$

Foram considerados os seguintes fluxos energéticos:

- 1 – Entrada de energia pela madeira enforcada
- 2 – Perda de energia nas paredes do forno
- 4 – Fluxos materiais de saída (gases, tiço e carvão)

Para o sistema produtivo do carvão vegetal a partir da Eq. 4.4 obtêm-se a Eq. 4.5:

$$E_{\text{Madeira}} = E_{\text{Carvão}} + E_{\text{Tiço}} + E_{\text{GC}} + E_{\text{GNC}} + E_{\text{Conv.Parede}} + E_{\text{outros}} \quad (4.5)$$

Em que,

E_{madeira} = Energia da madeira a 25°C;

$E_{\text{carvão}}$ = Energia do carvão vegetal a 400 °C;

$E_{\text{tiço}}$ = Energia do tiço a 400 °C;

E_{GC} = Energia dos gases condensáveis a 250 °C;

E_{GNC} = Energia dos gases não condensáveis a 250 °C;

$E_{\text{Conv.Parede}}$ = Energia perdida pela troca de calor entre a parede do forno e a atmosfera

E_{outros} = Fluxos de energia não contabilizados

Parte da energia contida nos principais elementos do balanço pode ser estimada através de seus respectivos poderes caloríficos a 25°C, os quais são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Poder calorífico da madeira e dos produtos da carbonização (Ferreira, 2009; Biomassa, 2013; Oliveira, 2012; Carneiro et al., 2012a).

	Madeira	Carvão Vegetal	Tiço	Alcatrão
PCS [kJ/kg]	19193	31499	26096	27675
W% (b.u.)	27,5	3,8	7,0	---
H%	6,401	3,731	6,403	---
PCI [kJ/kg]	12352	29483	22891	22412

A relação entre o PCS e o PCI dos componentes pode ser calculada pela Eq. 4.6 (Cortez et al., 2008).

$$PCI = [PCS_{b.s.} - h_{lv}(r + 9H_{dr_{b.s.}})](1 - U_{md}) \quad (4.6)$$

Em que,

h_{lv} = Calor latente da água [2310 kJ/kg]

U_{md} = umidade [% em massa, base úmida]

H_{dr} = Porcentagem de hidrogênio [% em base seca].

$r = U_{md}/(1 - U_{md})$

4.1.2.1. Gases Condensáveis

A energia dos gases não condensáveis pode ser decomposta em três parcelas (vide Eq. 4.7):

$$E_{GC} = E_{Piro} + E_{Alcatrão} + E_{vapor} \quad (4.7)$$

Em que,

E_{Piro} = Energia do ácido pirolenhoso a 250 °C

$E_{Alcatrão}$ = Energia do alcatrão a 250 °C

E_{vapor} = Energia contida do vapor de água a 250 °C

No caso do ácido pirolenhoso e do alcatrão, além da fração de energia química obtida pela queima do combustível a 25°C, expressa pelos seus poderes caloríficos, existe também um ganho de energia física obtida por elevar a temperatura destes produtos, que pode ser calculada pelo ganho de calor sensível dos componentes até atingirem 250 °C (temperatura média dos gases na saída da chaminé) somados à sua entalpia de vaporização, já que a 25 °C os compostos presentes nos GC estão no estado líquido.

Não foi encontrado na literatura o poder calorífico do ácido pirolenhoso produzido por fornos retangulares. Entretanto pode-se estimar seu valor com base em fórmulas que se fundamentam na composição elementar para estimar o PCS de um combustível. Channiwala e Parikh (2002)

estabeleceram uma fórmula que pode ser aplicada a combustíveis sólidos, líquidos e gasosos com um grau de precisão aceitável (1,45%) (Eq. 4.8).

$$\text{PCS}[\text{MJ/kg}] = 0,3491\text{C}\% + 1,1783\text{H}\% + 0,1005\text{S}\% - 0,1034\text{O}\% - 0,0151\text{N}\% - 0,0211\text{A}\% \quad (4.8)$$

Em que, C%, H%, S%, O%, N% e A representam respectivamente o carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio, nitrogênio e cinzas, porcentagem em massa (base seca). A partir da equação 4.8 e os dados da composição do ácido pirolenhoso obtidos pelos ensaios do APÊNDICE I, pode-se estimar seu PCS.

O calor sensível médio e a entalpia de vaporização dos componentes orgânicos contidos no pirolenhoso foi estimado pelo método de Joback (Joback e Reid, 1987), usado para prever as propriedades termodinâmicas destes componentes através de sua estrutura molecular orgânica, assim, calculou-se o calor específico médio dos elementos através da Eq. 4.9, e a entalpia de vaporização pela Eq. 4.10.

$$\text{Cp} = \sum a_i - 37,93 + \left[\sum b_i + 0,210 \right] T + \left[\sum c_i - 3,91 \cdot 10^{-4} \right] T^2 + \left[\sum d_i + 2,06 \cdot 10^{-7} \right] T^3 \quad (4.9)$$

$$\Delta H_{\text{vap}} = 15,3 + \sum H_{\text{vap},i} \quad (4.10)$$

Em que,

Cp = Calor específico do componente [J/mol.K]

h_{iv} = Entalpia de vaporização a 1 atm

T = Temperatura [K]

a_i , b_i , c_i , d_i e $h_{\text{iv},i}$ = Parâmetros relacionados aos grupos funcionais presente nas moléculas orgânicas (Joback e Reid, 1987), presentes no APÊNDICE II.

A Tabela 4.9 mostra os resultados do cálculo energético para o ácido pirolenhoso, considerando a média das corridas.

Tabela 4.9. Cálculo do conteúdo de energia do ácido pirolenhoso na corrida média (s/ água).

Caomponente	Vazão kg/ corrida	PCS 25°C kJ/kg	PCI 25°C kJ/kg	h _{lv} 1atm kJ/kg	Cp _{médio} T _{vap} -250°C kJ/kg.K	H _{lv} MJ	Q _{sens} MJ	E _{comb} (PCS) MJ	E _{comb} (PCI) MJ	E _{total} (PCS) MJ	E _{total} (PCI) MJ
Acido Acetico	4246	16362	14844	859	1,32	3648	1263	69469	63024	74380	64287
Furaldeido	1013	23314	22365	528	1,25	535	284	23617	22656	24436	22940
Metanol	869	22745	19901	1164	1,61	1011	315	19763	17291	21090	17606
2,6 dimetoxi fenol	764	26237	24759	351	1,44	269	247	20054	18924	20569	19171
p-cresol, 2-metoxi-	486	30472	28823	513	1,49	249	163	14806	14004	15218	14168
2 metoxi fenol	476	28625	27157	504	1,43	240	153	13617	12918	14010	13071
2-furancarboxaldeido, 5-metil-	424	26308	25066	387	1,35	164	129	11152	10626	11445	10755
1,2,4 trimetoxibenzeno	382	27953	26327	276	1,46	105	126	10674	10053	10905	10179
p-cresol	295	34390	32705	431	1,50	127	100	10150	9653	10377	9752
Corylon	258	27953	26327	464	1,41	120	82	7224	6804	7426	6886
1,2,3 trimetoxi-5metil-benzeno	230	29406	27655	271	1,51	62	78	6772	6369	6912	6447
Fenol	230	32538	31085	625	1,41	144	73	7482	7148	7698	7221
Acetato de etila	222	26059	23990	398	1,53	88	76	5772	5314	5937	5390
Acetol	216	22129	20283	617	1,47	133	71	4774	4376	4979	4447
3-metoxi-1,2-benzenediol	203	24177	22876	650	1,40	132	64	4913	4648	5109	4712
Acetato de metila	197	22129	20283	439	1,47	86	65	4357	3993	4508	4059
4 etil 2 metoxi fenol	159	31979	30182	355	1,55	56	55	5070	4786	5182	4841
2 metil 2 ciclopentenona	156	36042	33720	341	1,62	53	57	5612	5250	5722	5307
m-cresol	150	34390	32705	578	1,50	86	50	5143	4891	5280	4942
3,4-dimetil-fenol	113	35817	33952	696	1,57	79	40	4053	3842	4172	3882
Acetona	66	31073	28719	539	1,62	36	24	2057	1901	2117	1925
4-metil-1,2-benzenediol	38	28625	27157	479	1,46	18	13	1091	1035	1122	1047
Soma	11192					7443	3529	257622	239506	268594	243036

h_{lv} (Entalpia de vaporização específica); Cp_{médio} (Calor específico médio entre a T de vaporização e 250 °C); H_{lv} (Entalpia de vaporização absoluta); Q_{sens} (Calor Sensível)

Com os resultados da Tabela 4.10, chega-se a Tabela 4.10, que resume os resultados obtidos para o cálculo energético do ácido pirolenhoso para a corrida média.

Tabela 4.10. Conteúdo energético do ácido pirolenhoso (sem água)

	Total MJ	Total PCS %	Total PCI %
Energia (PCS)	268594	100,0%	---
Energia (PCI)	243036	---	100,0%
Entalpia vap	7443	2,8%	---
Calor Sensível	3529	1,3%	1,5%
PCS _{25°C}	257622	95,9%	---
PCI _{25°C}	239506	---	98,5%

Nota-se que o calor sensível mais a entalpia de vaporização contidos no ácido pirolenhoso correspondem a apenas 4,1% do total de energia, no caso do cálculo feito pelo PCS, e a 1,5% no cálculo feito pelo PCI, sendo que a maior parte da energia é proveniente dos poderes caloríficos das substâncias. Para os cálculos com base no PCI, a energia requerida para a evaporação da água e os outros componentes dos GC não foi considerada.

O calor sensível da madeira, alcatrão e carvão, foi estimado pelas equações 4.11, 4.12 e 4.13, respectivamente (Bellais et al., 2003; Blondeau et al., 2012)

$$Cp_{\text{madeira}} = 1500 + T \quad (4.11)$$

$$Cp_{\text{Carvão}} = 1430 + 0,355T - 7,32 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (4.12)$$

$$Cp_{\text{Alcatrão}} = 1800 - 800 \exp(-0,0055T) \quad (4.13)$$

Em que,

Cp_{Madeira} = Calor específico da madeira [J/kg.K]

$Cp_{\text{Carvão}}$ = Calor específico do carvão [J/kg.K]

$Cp_{\text{Alcatrão}}$ = Calor específico do alcatrão [J/kg.K]

T = Temperatura [K]

A energia do vapor de água presente nos GC pode ser calculada pelo uso de tabelas de vapor (Cengel e Boles, 2005), a 1 atm e 250 °C e a 1 atm e 25°C, encontrando-se uma diferença de entalpia de 2870 kJ/kg, e uma entalpia de vaporização de 2260 kJ/kg. A entalpia de vaporização utilizada para o alcatrão foi de 610 kJ/kg, de acordo com Goteti (2010). As Tabelas 4.11, 4.12 e a Figura 4.10, mostram os resultados obtidos pela aplicação das equações acima e os cálculos finais para a energia total dos GC para a corrida média.

Tabela 4.11. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos GC em valores absolutos.

Componente	Vazão kg/ corrida	PCS 25°C kJ/kg	PCI 25°C kJ/kg	h_{iv} kJ/kg	$Cp_{\text{méd}}$ $T_{\text{vap}} - 250 \text{ °C}$ kJ/kg.K	Calor Sensível kJ/kg	H_{iv} MJ	Q_{sens} MJ	E_{comb} (PCS) MJ	E_{comb} (PCI) MJ	E_{total} (PCS) MJ	E_{total} (PCI) MJ
Ácido pirolenhoso	11192	23019	21400	665	0,01	315	7443	3529	257622	239506	268594	243036
Alcatrão	1285	27675	22412	610	1,70	382	784	491	35561	28798	36836	29290
Vapor H ₂ O	78916	---	---	2260	2,49	610	178351	48108	---	---	226459	48108
GC (Total)	91393	3208	2935,72	2041	2,38	570	186578	52129	293183	268305	531889	320433

Tabela 4.12. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos Gases Condensáveis (GC) em porcentagem com base no PCS e PCI dos componentes.

Componente	PCS				PCI			
	H _{lv}	Q _{sens}	E _{comb}	E _{total}	H _{lv}	Q _{sens}	E _{comb}	E _{total}
	MJ	MJ	(PCS)	(PCS)	MJ	MJ	(PCI)	(PCI)
			MJ	MJ			MJ	MJ
Ácido pirolenhoso	1,40%	0,66%	48,4%	50,5%	---	1,10%	74,7%	75,8%
Alcatrão	0,15%	0,09%	6,7%	6,9%	---	0,15%	9,0%	9,1%
Vapor H ₂ O	33,5%	9,0%	---	42,6%	---	15,0%	---	15,0%
GC (Total)	35,1%	9,8%	55,1%	100%	---	16,3%	83,7%	100%

Na Tabela 4.12, a soma total de GC é de 91393 kg, pouco menor que o valor encontrado no balanço de massa, apresentado na Tabela 4.3. Isto ocorre porque 2,06% dos compostos presentes nos GC não foram identificados nas análises do APÊNDICE I e, portanto, não foi possível contabilizar seu conteúdo energético

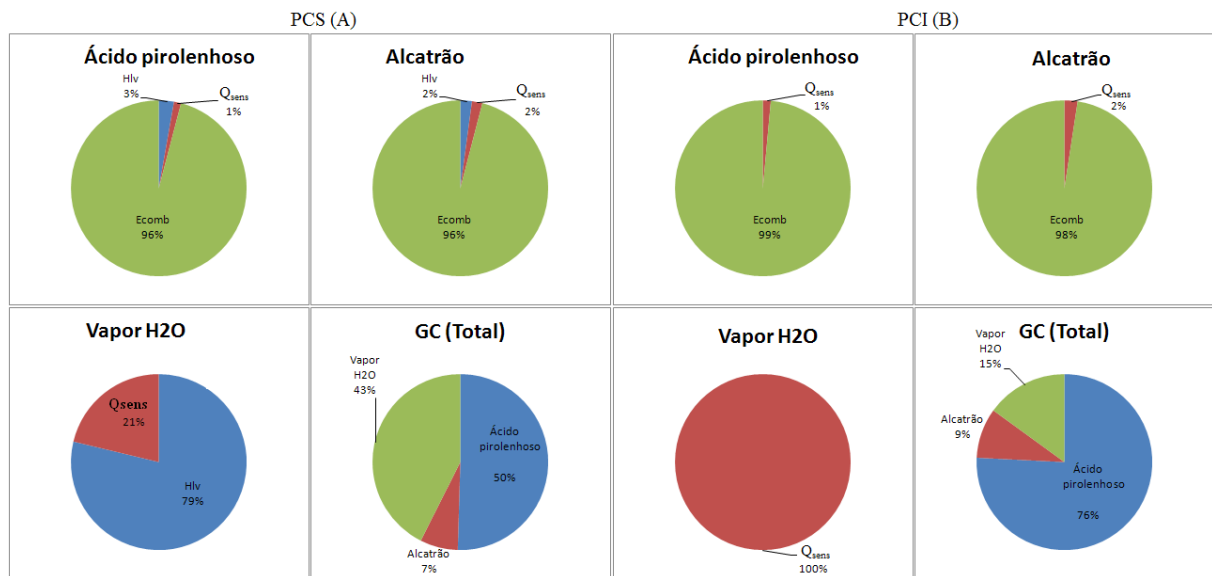


Figura 4.10. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos GC, base no PCS e base no PCI (B).

Nota-se que, pela Tabela 4.12 e pela Figura 4.10, para o cálculo com base no PCS, o ácido pirolenhoso corresponde a maior parte do conteúdo energético dos GC com 50% do total, seguido pelo vapor de H₂O com 42,6% e o alcatrão com 6,9%. O calor sensível presente nos GC corresponde a 9,8%, a entalpia de vaporização 35,1% (sendo que 95,4% desta parcela

vêm da vaporização da água) e 55,1% da energia química dos componentes orgânicos (alcatrão e ácido pirolenhoso).

4.1.2.2. Gases Não Condensáveis

A energia dos GNC foi calculada através da equação 3.15 (Para o PCS) e 3.16 (Para o PCI), ou seja, através da diferença de entalpia entre os reagentes e os produtos da combustão dos GNC. Os valores de referência de entalpia dos componentes da reação foram calculados pelos polinômios da NASA (*National Aeronautics and Space Administration* dos EUA), desenvolvidos primeiramente por Zeleznik e Gordon (1968), que estimam, com um grau de confiança de até cinco dígitos, as propriedades termodinâmicas das espécies envolvidas na reação de combustão através de funções de partição em função da temperatura (Eq. 4.14, 4.15 e 4.16) (McBride e Gordon, 1992).

$$\frac{C_p}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \quad (4.14)$$

$$\frac{H}{R} = a_1 + a_2 \frac{T}{2} + a_3 \frac{T^2}{3} + a_4 \frac{T^3}{4} + a_5 \frac{T^4}{5} + \frac{a_6}{T} \quad (4.15)$$

$$\frac{S}{R} = a_1 \ln T + a_2 T + a_3 \frac{T^2}{2} + a_4 \frac{T^3}{3} + a_5 \frac{T^4}{4} + a_7 \quad (4.16)$$

em que,

C_p = Calor específico [cal/mol.K]

H = Entalpia [cal/mol]

S = Entropia [cal/mol.K]

T = Temperatura [K]

Os polinômios de 7 termos acima incluem na verdade 14 constantes. O primeiro conjunto pertence ao intervalo de temperatura de 200-1000 K, e o segundo de 1000-6000 K, que podem ser obtidos em Burcat (2016).

Assim como nos GC, os GNC possuem uma parcela de energia química dos componentes combustíveis (CH_4 , CO e H_2), expressas pelo poder calorífico destes componentes a 25°C , e uma parcela de energia física, que pode ser calculada através do ganho de energia sensível ao elevar a temperatura dos GNC. A Tabela 4.13 mostra o resultado do cálculo energético para os GNC, considerando novamente a corrida média.

Tabela 4.13. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos GNC em valores absolutos para a corrida média.

Componente	Vazão kg/ Corrida	PCS 25°C kJ/kg	PCI 25°C kJ/kg	ϕ	E_{comb} PCI _{25°C} MJ	$C_{\text{sensível}}$ 25-250°C MJ	Energia (PCS) 250°C MJ	Energia (PCI) 250°C MJ
CH_4	3689	55137	50062		184688	2141	205555	186829
CO	20271	10109	10109		204917	4797	209713	209713
H_2	775	140242	120045		92994	2526	111166	95520
CO_2	62352	---	---	-	---	13235	13235	13235
$\text{N}_2 + \text{O}_2$	440490	---	---	-	---	101441	101441	101441
GNC	527577	980	915		482599	124140	641110	606738

Os resultados mostram um PCS e PCI médios a 25°C de 980 e 915 kJ/kg, respectivamente. Entretanto este valor considera a massa dos componentes combustíveis mais a do CO_2 e a do ar, se a massa de oxigênio e nitrogênio for desconsiderada estes valores sobem para 5936 e 5542 kJ/kg, para PCS e PCI, respectivamente. Quando se considera o ganho de temperatura, o calor sensível faz a energia específica dos GNC subir para 1215 (PCS) e 1150 kJ/kg (PCI). Por exemplo, para os cálculos com base no PCI, este ganho de calor sensível representa 20,46% da energia total dos GNC a 250°C . A Tabela 4.14, e as Figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados do balanço energético para os GNC em porcentagem para os cálculos com base no PCS e no PCI.

Tabela 4.14. Resultados do cálculo do conteúdo energético dos (GNC) a 250 °C em porcentagem, com base no PCS e PCI.

Componente	PCS			PCI		
	E _{comb}	C _{sen}	Energia _{Total}	E _{comb}	C _{sen}	Energia _{Total}
CH ₄	31,73%	0,33%	32,06%	30,44%	0,35%	30,79%
CO	31,96%	0,75%	32,71%	33,77%	0,79%	34,56%
H ₂	16,95%	0,39%	17,34%	15,33%	0,42%	15,74%
CO ₂	---	2,06%	2,06%	---	2,18%	2,18%
N ₂ + O ₂	---	15,82%	15,82%	---	16,72%	16,72%
GNC	80,64%	19,36%	100,00%	79,54%	20,46%	100,00%

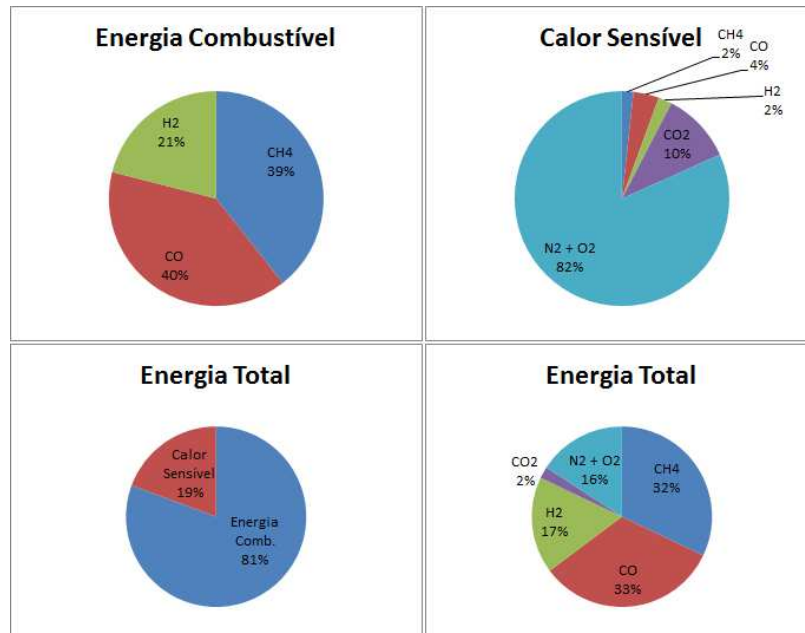


Figura 4.11. Relação percentual entre os componentes energéticos dos GNC, com base no PCS.

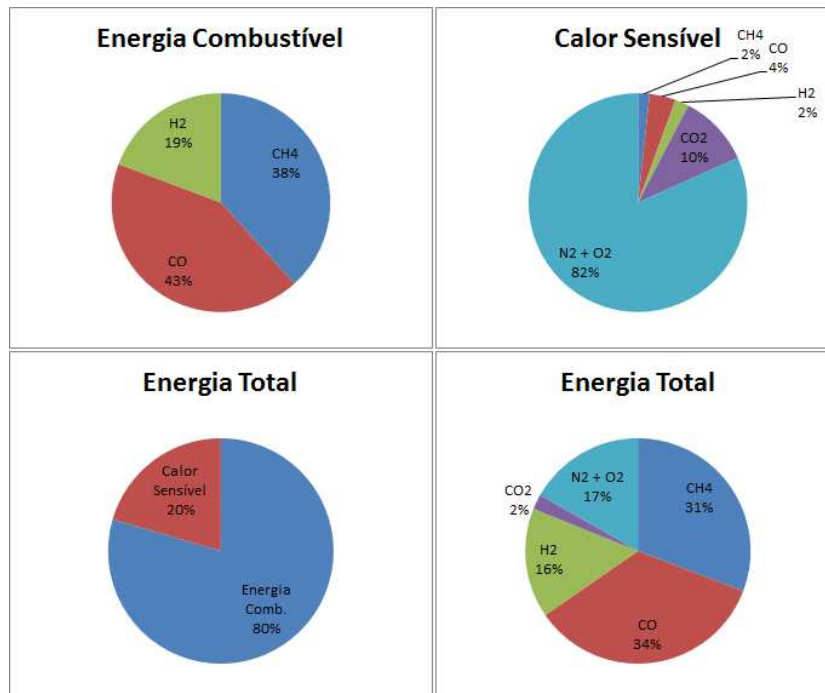


Figura 4.12. Relação percentual entre os componentes energéticos dos GNC, com base no PCI.

Em relação à energia dos GNC a 250°C, para o cálculo com base no PCI, a energia química dos combustíveis representa 79,54% do total, sendo o CO responsável pela maior parte dela, com 34,56%, seguido do CH₄, com 30,79%, e do H₂ com 15,74%.

Os GNC apresentam uma grande quantidade de oxigênio e nitrogênio, sendo que este representam em conjunto 70,94% da massa emitida. Este fato reflete de maneira importante nos resultados, pois o calor sensível destes componentes representam 16,71% do conteúdo de energia dos GNC a 250 °C (para o cálculo com base no PCI).

4.1.2.3. Trocas Térmicas na Parede do Forno

Outra parcela significativa de energia diz respeito às perdas por condução e convecção natural nas paredes do forno de carbonização. Para estimar as perdas por condução pode-se utilizar a Lei de Condução Térmica de Fourier (Eq. 4.17), que estabelece que o fluxo de calor que atravessa um material é proporcional ao gradiente de temperatura, a área, a espessura e a característica térmicas deste material, chamada de condutividade térmica.

$$\dot{Q} = \frac{kA\Delta T}{\Delta x} \quad (4.17)$$

em que,

$\dot{Q}$ = Fluxo de calor [W]

ΔT = Gradiente de temperatura [K]

Δx = Espessura do material [m]

k = Condutividade térmica [W/mK]

A = Área [m²]

Quando existem várias camadas de material na mesma superfície A , costuma-se utilizar o conceito de resistência térmica (R), para somar os efeitos de cada material, como mostra a Eq. 4.18. Deste modo, a Eq. 4.17 pode ser reescrita na forma da Eq. 4.19.

$$R = \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{\Delta x_3}{k_3} + \dots \quad (4.18)$$

$$\dot{Q} = \frac{A\Delta T}{R} \quad (4.19)$$

A existência de um fluido mais frio ao redor do forno (ar), acelera o processo de transferência de calor. Esta transferência, por convecção natural, ocorre simultaneamente com a transferência por condução, e pode ser calculada pela Lei de do Resfriamento de Newton (4.20). Em geral, a convecção de calor pode ser definida de uma forma simplificada, associando-a ao fenómeno da condução, pelo modelo descrito pelas Eq. 4.21 e 4.22, onde utiliza-se o coeficiente de transferência de calor por convecção (ou coeficiente de película) dentro do conceito de resistência térmica.

$$\dot{Q} = u A \Delta T \quad (4.20)$$

$$R_{\text{Total}} = \left(\frac{1}{u_1 A} \right) + \left(\frac{\Delta x_1}{k_1 A} \right) + \left(\frac{1}{u_2 A} \right) \quad (4.21)$$

$$\dot{Q} = \frac{(\Delta T)_{\text{total}}}{R_{\text{Total}}} \quad (4.22)$$

em que,

u = coeficiente de película [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

O Forno de carbonização retangular da Plantar é composto pelas paredes laterais externas (208 m^2), teto (132 m^2) e portas laterais (41 m^2). Tanto o teto quanto a parede são construídos por tijolos de 23 cm de espessura, já as portas por duas chapas de aço carbono com 3/16” mais 50 mm de concreto refratário em seu interior. A Tabela 4.15 resume as características físicas do forno e que são utilizadas nos cálculos.

Tabela 4.15. Características físicas do forno utilizadas na análise de perda de calor pelas paredes do forno.

	Parede	Teto	Portas		Película de Ar		Unidade
			Aço Carbono	Concreto Refratário	Teto	Parede e Portas	
k	0,80	0,80	54	0,46	---	---	W/mK
R	0,29	0,29	0,0002	0,11	0,055	0,044	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
Δx	0,23	0,23	0,095	0,05	---	---	m
Área	208	132	41	41	---	---	m^2

O coeficiente de película é uma função complexa do escoamento do fluido, das propriedades físicas do meio fluido e da geometria do sistema. Portanto, seu valor depende das condições atmosféricas, como velocidade do vento e temperatura externa e também da orientação do objeto e, conseqüentemente, não é uniforme sobre a superfície, principalmente nas externas. Deste modo, utiliza-se, geralmente, um valor médio, onde foi considerado para o caso a existência de uma convecção natural (BCA, 2008; UNEP, 2006).

A temperatura no forno não é constante durante o ciclo de carbonização. Segundo as informações coletadas, a temperatura aumenta de maneira exponencial nas primeiras 48 horas do processo, e depois tende a se estabilizar, com a temperatura interna do teto chegando a 280

°C e da parede em 200°C. A Figura 4.13, mostra a perda térmica média durante o ciclo de carbonização no forno retangular da Plantar.

Através das Eq. 4.17 a 4.20 pode-se estimar a temperatura externa dos componentes do forno retangular. Quando o forno atinge o equilíbrio térmico, com as internas da parede e do teto a 200 °C e 280 °C, respectivamente, as temperaturas da superfícies externas calculadas das portas, teto e parede são respectivamente 76 °C, 66 °C e 48 °C, gerando um fluxo total de calor para a atmosfera de 255 kWt.

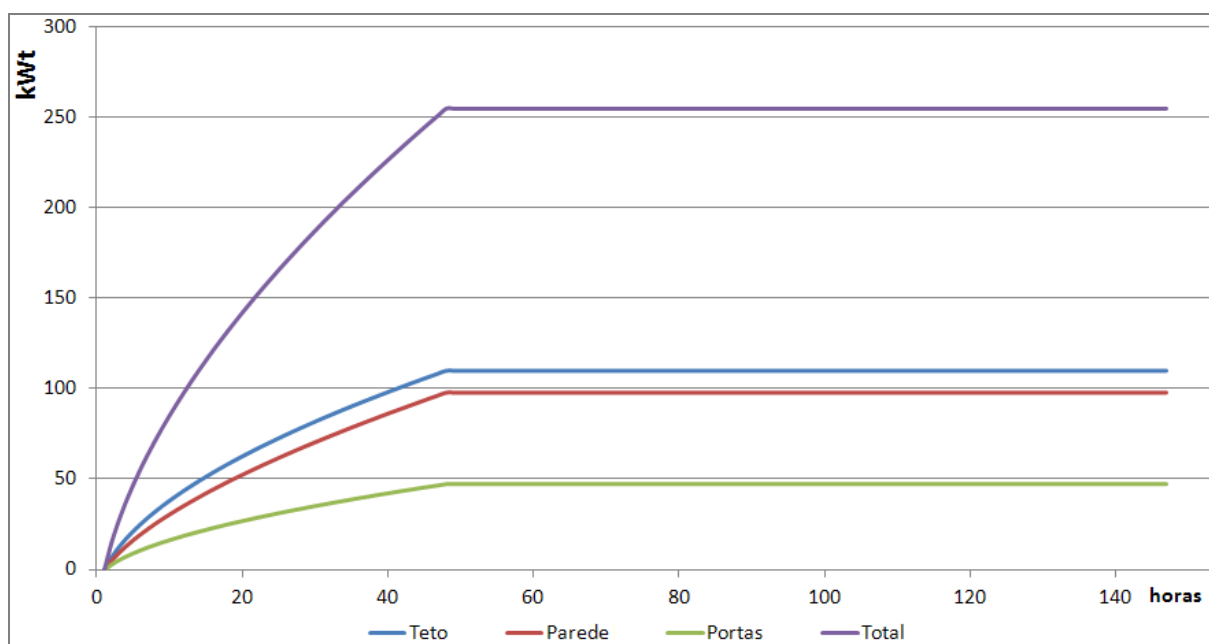


Figura 4.13. Fluxo de calor perdido para o ambiente durante a carbonização [kWt].

De acordo com os cálculos realizados, no total, estima-se que durante a carbonização são perdidos para a atmosfera 106.753 MJ de energia na forma de calor.

4.1.2.4. Resultados do Balanço de Energia

Finalmente, apresenta-se o resultado do balanço energético de acordo com a equação 4.5, tanto para o cálculo baseado no PCS, na Tabela 4.16 e na Figura 4.14, quanto para o PCI, na Tabela 4.17 e na Figura 4.15.

Tabela 4.16. Resultados do balanço energético, cálculos baseados no PCS.

E_{madeira}	$E_{\text{carvão}}$	$E_{\text{tiço}}$	E_{GC}	E_{GNC}	$E_{\text{conv. parede}}$	E_{outros}
MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
2899345	1447621	108253	531889	641110	106753	63718
%	%	%	%	%	%	%
100,0%	49,9%	3,7%	18,3%	22,1%	3,7%	2,2%

Tabela 4.17. Resultados do balanço energético, cálculos baseados no PCI.

E_{madeira}	$E_{\text{carvão}}$	$E_{\text{tiço}}$	E_{GC}	E_{GNC}	$E_{\text{conv. parede}}$	E_{outros}
MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
2573761	1408696	102151	320433	606738	106753	28990
%	%	%	%	%	%	%
100,0%	54,7%	4,0%	12,4%	23,6%	4,1%	1,1%

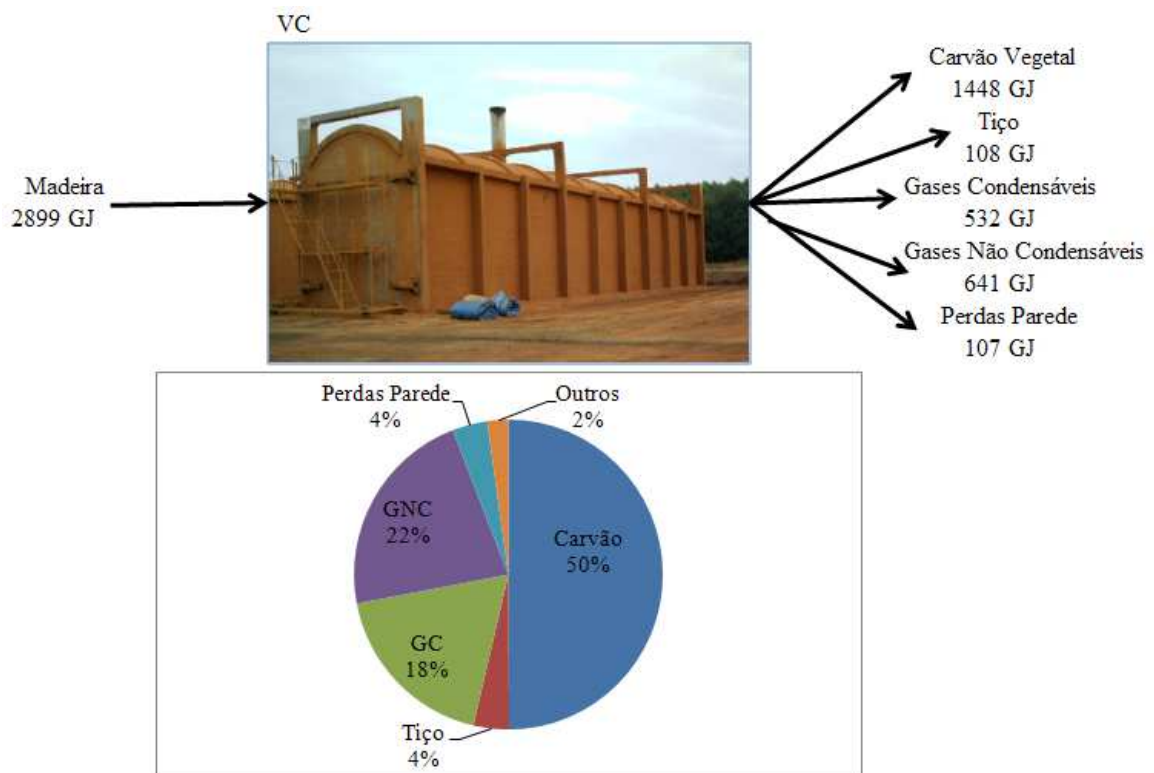


Figura 4.14. Resultados do Balanço de energia para um forno retangular, cálculos com base no PCS dos componentes.

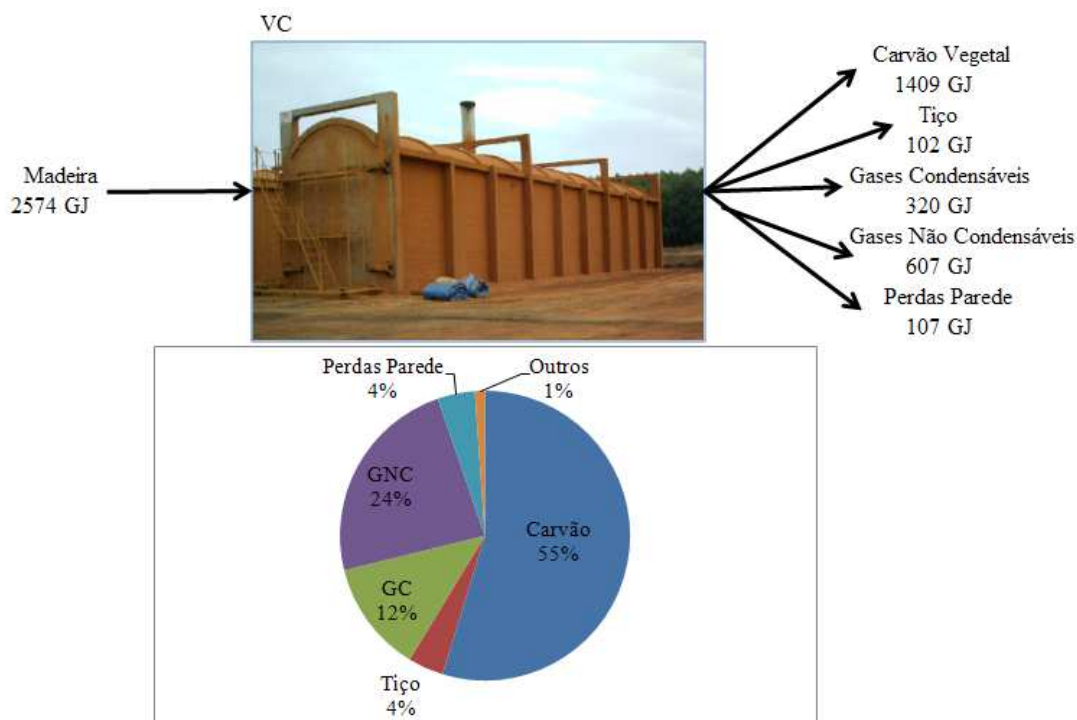


Figura 4.15. Resultados do Balanço de energia para um forno retangular, cálculos com base no PCI dos componentes.

Segundo os resultados, os gases produzidos pela carbonização nos fornos retangulares contém 1.172.999 MJ, o que corresponde a 40,5% do conteúdo energético da madeira, com base no PCS, ou 927.171 MJ, o que corresponde a 36,0% com base no PCI.

A energia não contabilizada, E_{outros} (2,2% no PCS e 1,1% no PCI), está relacionada a possíveis fluxos não mensurados e as limitações das análises e dos cálculos do balanceamento, visto que, foram utilizados valores médios de emissões, entalpias e temperaturas. A diferença entre os cálculos realizados pelo PCS e PCI diz respeito ao calor latente de condensação da água.

Ambos os métodos são bastante utilizados na literatura e não há um consenso sobre qual o mais apropriado, já que os dois possuem suas utilidades e aplicabilidades, e a escolha depende unicamente do sistema a ser analisado. Neste trabalho, os cálculos de eficiência serão baseados no PCI, pois o uso final da energia gerada será na siderurgia de ferro gusa (no uso do carvão vegetal) ou na geração de eletricidade (no uso dos gases da carbonização) e, em ambos os casos, o calor latente de condensação da água não é aproveitado, ficando a água emitida para a atmosfera na forma de vapor.

Pode-se concluir que o sistema atual de produção de carvão vegetal pelos fornos retangulares possui uma eficiência energética de aproximadamente 54%. Já para a eficiência global da UC, deve-se considerar que o tiço produzido será novamente carbonizado e transformado em carvão, o que aumentando a eficiência global em relação a eficiência individual do forno retangular. Se for considerada a mesma eficiência para a carbonização do tiço, chega-se a uma eficiência global para a UC de aproximadamente 56%.

Em uma perspectiva ainda mais abrangente de balanço energético, dentro do ciclo de vida do carvão vegetal, deve-se considerar ainda a existência de outros fluxos energéticos de entrada como o Diesel utilizado nos maquinários da floresta e da UC, os quais serão abordados adiante no Capítulo 5, que trata sobre a ACV.

Nas Figuras 4.16 e 4.17, apresenta-se a variação temporal do conteúdo energético dos gases durante o período de carbonização no forno retangular.

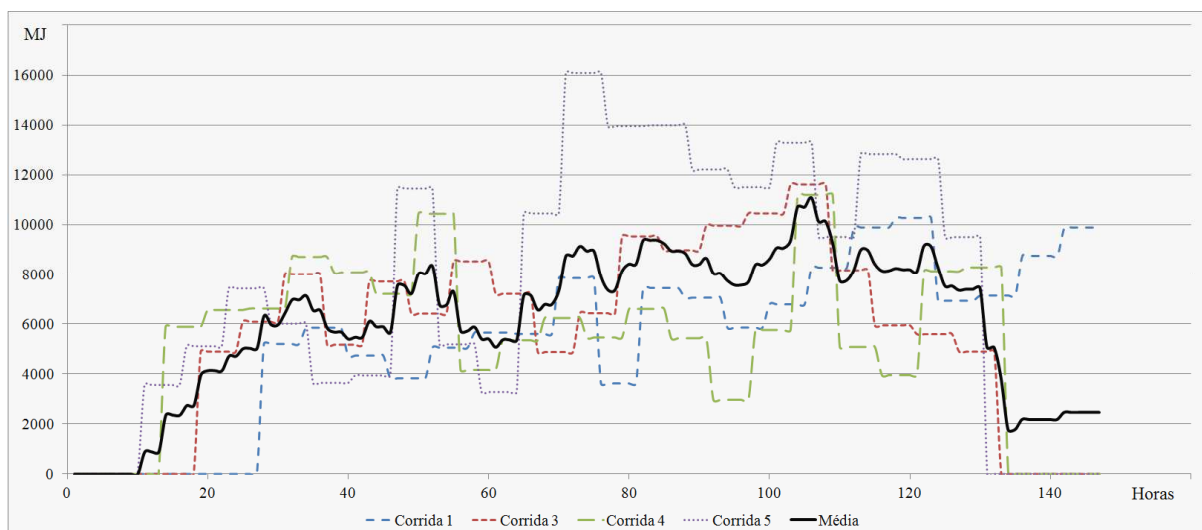


Figura 4.16. Variação horária da energia dos gases emitidos durante a carbonização.

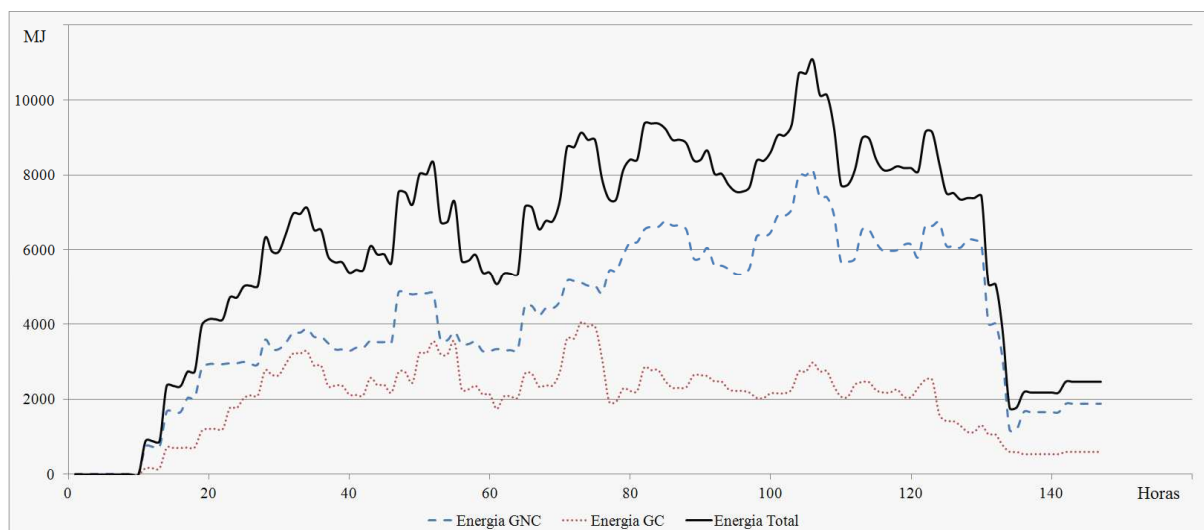


Figura 4.17. Variação temporal da energia dos GNC e dos GC durante a carbonização, para a média horária.

4.2. Funcionamento do Sistema em *Cluster* e Determinação do Potencial Energético

Em média, os fornos retangulares precisam de 18 dias para completar seu ciclo de produção, contemplando as seguintes fases:

Carregamento/Descarregamento: 1 dia

Carbonização: 5 dias

Resfriamento: 12 dias

Consequentemente, além da variação de energia dos gases ao longo da carbonização, o forno estará emitindo gases combustíveis em apenas 5 dias dentro de seu ciclo. Portanto, é preciso ajustar o funcionamento do conjunto de fornos, em um sistema de *cluster*, para garantir um suprimento fixo de energia ao grupo gerador.

A UC da Plantar, que é utilizada como base deste estudo, contem 120 fornos retangulares, os quais terão seus ciclos ajustados com o objetivo de manter, na medida do possível, um fluxo constante de energia na entrada do queimador central ou caldeira. A Figura 4.18 mostra o esquema de funcionamento do *cluster*. Nota-se que, da totalidade de fornos, apenas alguns fornos estão em fase de carbonização e, portanto, enviando gases ao queimador, já os outros fornos estão em fase de resfriamento ou manutenção e, assim, não estão produzindo gases.

Para equalizar a produção de gases é preciso estabelecer um período ótimo entre o início de carbonização de cada forno, ou seja, uma sequência de operação. Isto pode impedir, por exemplo, que uma situação de alta geração de gases, onde muitos fornos estarão carbonizando, que produzirá em seguida uma situação inversa, com pouca geração de gases, onde a maioria dos fornos estará em fase de resfriamento.

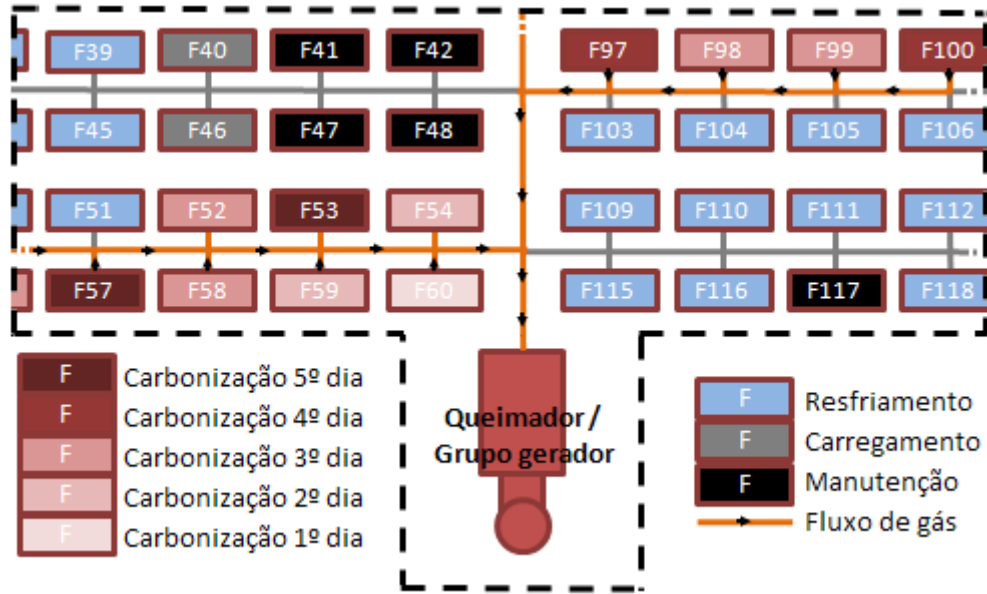


Figura 4.18. Esquema de funcionamento do *cluster* de fornos.

Para estabelecer a sequência de operação, considerou-se que os 120 fornos são idênticos e possuem ciclos exatos de 432 horas (18 dias), sendo que a sequência ótima de operação dos fornos pode ser estabelecido da seguinte maneira (Eq. 4.23):

$$F_n = F_{n-1} + \Delta_t \quad (4.23)$$

Em que,

F_n = Início da carbonização no Forno número n

F_{n-1} = Início da carbonização no Forno anterior ao n

Δ_t = Intervalo de tempo entre o início da operação do F_n e do F_{n-1}

Considerando que o Δ_t deve ser o mesmo entre todos os fornos, com a Eq 4.23 pode-se encontrar o valor de Δ_t que gera o menor desvio padrão de potência térmica do *cluster*, encontrando assim um fluxo homogêneo máximo de energia.

Estes cálculos foram realizados com o auxílio de um programa desenvolvido em Excel®/VBA, que calcula a potência térmica do *cluster* de acordo com a sequência de operação dos fornos de carbonização. Nele, o valor ótimo de Δ_t foi determinado através de uma otimização matemática com função objetivo realizada através do complemento solver, disponível no Excel®.

No software, de acordo com um determinado Δ_t , tem-se a estimativa da composição e do fluxo de gases gerados para cada hora durante todo o ciclo do *cluster*, 18 dias. A partir destes dados o programa pode determinar as informações necessárias ao estudo, como PCI e potência térmica disponível. Para tanto, o programa realiza o balanço químico da reação de combustão e calcula a energia das espécies envolvidas, com base nas Eq. 4.8 a 4.16, considerando fatores como a necessidade de excesso de ar, a temperatura de entrada dos gases, a temperatura do ar de combustão, entre outros. A Tabela 4.18 mostra os dados de entrada no software utilizados na presente análise.

Tabela 4.18. Dados de entrada para o cálculo do potencial energético

Temperatura dos gases na entrada do queimador	67	[°C]
Temperatura Ambiente	24,5	[°C]
Temperatura do ar de combustão	24,5	[°C]
Pressão Ambiente [Pa]	89.072	[Pa]
Excesso de O ₂ requerido p/ combustão	5	%

O valor ótimo de Δ_t encontrado foi de 3,6 horas, o qual gera uma potência média ao longo do ciclo de 65,265 MWt e uma mínima de 63,472 MWt, como mostra a Tabela 4.19 e a Figura 4.19.

Tabela. 4.19. Resultados do potencial energético do *cluster* de fornos.

Pot. Média	65.265	kWt	Vazão Média	49,7	kg/s
Pot. Mínima	63.472	kWt	Δ_t fornos	3,6	h
Pot. Máxima	67.647	kWt	PCI Médio 67°C	1.312	kJ/kg
Desvio Padrão	697	kWt	PCS Médio 67°C	1.412	kJ/kg

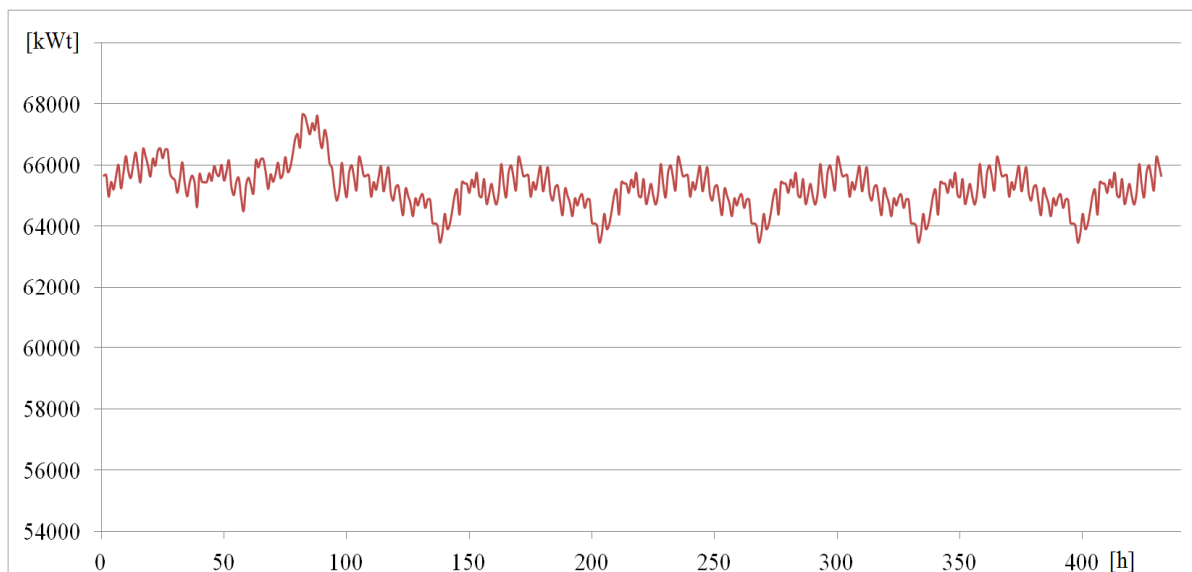


Figura 4.19. Variação da potência térmica disponível no *cluster* de fornos.

Na Figura 4.19, nota-se que a potência térmica varia entre 63 e 68 MWt. Entretanto, no desenvolvimento de um projeto de geração termoelétrica, deve-se garantir que, geralmente, ele receba a potência necessária para seu funcionamento pleno na maior parte do tempo possível, o que imprime melhor viabilidade para o empreendimento. Assim, será considerada a potência mínima de 63.472 kWt. Porém, será respeitado o uso de apenas 90% da energia dos gases, para contabilizar as possíveis perdas de gases e a existência de fornos em manutenção ou que estiverem fora de sincronia. Este valor foi estabelecido considerando o histórico de utilização dos fornos (os quais têm em média 95% de utilização) e a eficiência de queima reportada por Cardoso et al. (2010) de aproximadamente 95%. Portanto, considera-se uma potência disponível de 57125 kWt.

Este resultado mostra que, no mínimo, são disponíveis 88840 GJ de energia ao longo dos 18 dias, considerando a potência de 57125 MWt, o que representa a recuperação de 28,8% da energia da madeira enfiada nos 120 fornos. Uma medida como o pré-aquecimento dos gases da carbonização de 67 °C para 150 e 200 °C elevaria o potencial para 60368 MWt e 62352 MWt, tornando possível a recuperação de 30,4% e 31,4% da energia da madeira, respectivamente. O aumento da temperatura dos gases pode ser realizado pelo isolamento da tubulação que irá conduzir os gases à caldeira, ou então, pela troca de calor com os gases de exaustão.

Uma possibilidade de backup de energia para este sistema, como forma de aumentar sua confiabilidade acerca da disponibilidade de geração, é considerar o uso dos resíduos florestais

coletados na UC. Apesar de a casca ser utilizada para a produção de carvão vegetal, durante o processo de transporte e empilhamento da madeira nos pátios e fornos da UC parte dela é perdida por desprendimento, aumentando a quantidade de resíduos no ciclo de produção.

Basicamente os resíduos deixados na UC são as cascas e galhos remanescentes que se desprendem das toras de Eucalyptus durante as operações de transporte e carga, a Figura 4.20 mostra os resíduos gerados na UC Itacambira.



Figura 4.20. Resíduos florestais na UC Itacambira da Plantar siderúrgica.

De acordo com Carneiro et al. (2012) do conteúdo energético de uma árvore de Eucalyptus, as cascas representam 7,03%, galhos 2,28%, folhas 1,95% e ponteira 0,35%, sendo o restante, 88,38%, madeira. Cerca de 11% da casca é deixada no campo, 15% na UC e o remanescente é carbonizado junto com a madeira nos fornos. Segundo os mesmos autores, a casca possui um PCI de 15.007 kJ/kg e os galhos de 15.987 kJ/kg.

De acordo com análises realizadas recentemente, hoje a UC Itacambira produz cerca de 964 toneladas de resíduos aproveitáveis mensalmente. Considerando que os resíduos são predominantemente cascas, e um fator de capacidade de 90%, estima-se uma potência disponível de 6,22 MWt, a qual pode ser utilizada em um sistema de queima híbrido (gases de carbonização mais resíduos) para suprir necessidades de geração quando os gases forem insuficientes. Entretanto, este trabalho está ficando no uso dos gases da carbonização, sendo que o uso dos resíduos e sua queima está fora de seu escopo.

É importante avaliar se o *cluster* produz um combustível que possa ser facilmente queimado em uma caldeira ou em um queimador de gases de carbonização. A inflamabilidade do combustível em seu valor mais crítico, ou seja, na composição correspondente à menor potência produzida pelo *cluster* (63472 MWt), foi avaliada pelo método da ISO 14151 e pelo método da TAC, descritos no item 3.4 do Capítulo 3. Os resultados são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela. 4.20. Resultado da análise de Inflamabilidade do *cluster* na hora de menor potência.

Composição <i>Cluster</i> , hora = 203, Temperatura = 24,5°C					
Ar [kg]	H ₂ [kg]	CO ₂ [kg]	CO [kg]	CH ₄ [kg]	GC [kg]
125247	241	17493	6049	1125	24937
PCI _{25°C} =	1268	[kJ/kg]	TAC _{mistura}	1092	°C
PCS _{25°C} =	1367	[kJ/kg]	TAC _{referência}	900	°C
Resultado da Eq. 3.16:	1,51	Então o gás é inflamável			
Resultado da Eq. 3.18:	0,90	Então o gás não é inflamável			

O resultado da Eq. 3.16, que usa o método da ISO 10156, teve um resultado acima da unidade, portanto, indica que o gás pode ser inflamável ao se misturar com o ar. Já o método da TAC, Eq. 3.18, indica que esta composição não é inflamável na temperatura ambiente.

No caso do método da TAC, para que o gás se torne inflamável, deve-se aumentar sua temperatura, o que, segundo os cálculos realizados pela Eq. 3.18, deve-se atingir no mínimo a temperatura de 100 °C, o que pode ser facilmente alcançado ao se trabalhar com um queimador já pré-aquecido, o qual fica na faixa dos 850 °C (Ver item 3.3). Este resultado mostra novamente a importância de se manter a temperatura ou pré-aquecer os gases da carbonização.

A Tabela 4.21 mostra a sequência de operação dos fornos segundo uma estimativa diária, onde pode-se ter melhor ideia do esquema de funcionamento do sistema, sendo representadas as fases de cada um dos 120 fornos ao longo dos 18 dias de ciclo.

Tabela 4.21. Cronograma de operação diária do *cluster*.

FORNOS	Dia de Carga	Dia																		FORNOS	Dia de Carga	Dia																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
F1	18	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	F61	8	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R				
F2	18	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	F62	9	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R				
F3	18	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	F63	9	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R				
F4	18	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	F64	9	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R				
F5	18	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	F65	9	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R				
F6	18	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	F66	9	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R				
F7	18	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	F67	9	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R				
F8	1	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F68	10	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F9	1	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F69	10	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F10	1	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F70	10	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F11	1	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F71	10	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F12	1	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F72	10	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F13	1	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F73	10	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F14	1	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F74	10	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F15	2	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F75	11	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F16	2	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F76	11	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F17	2	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F77	11	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F18	2	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F78	11	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F19	2	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F79	11	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F20	2	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F80	11	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F21	2	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F81	11	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R				
F22	3	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F82	12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R				
F23	3	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F83	12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R				
F24	3	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F84	12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R				
F25	3	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F85	12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R				
F26	3	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F86	12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R				
F27	3	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F87	12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R				
F28	4	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F88	13	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R			
F29	4	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F89	13	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R			
F30	4	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F90	13	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R			
F31	4	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F91	13	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R			
F32	4	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F92	13	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R			
F33	4	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F93	13	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R			
F34	4	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F94	13	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R			
F35	5	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	F95	14	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R		
F36	5	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	F96	14	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R		
F37	5	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	F97	14	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F38	5	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	F98	14	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F39	5	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	F99	14	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F40	5	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	F100	14	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F41	5	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	F101	14	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F42	6	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	F102	15	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F43	6	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	F103	15	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F44	6	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	F104	15	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F45	6	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	F105	15	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F46	6	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	F106	15	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F47	6	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	F107	15	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	
F48	7	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	F108	16	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R
F49	7	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	F109	16	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R
F50	7	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	F110	16	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R
F51	7	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	F111	16	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R
F52	7	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	F112	16	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R
F53	7	R	R	R	R	R	R	Cg	C1	C2	C3	C4	C5	R	R	R	R	R	R	F113																							

Em que, Cg = carregamento / C1 = Carbonização 1º dia / C2 = Carbonização 2º dia / C3 = Carbonização 3º dia / C4 = Carbonização 4º dia / C5 = Carbonização 5º dia / R = Resfriamento.

4.3. Avaliação das Tecnologias de Conversão Energética

Neste item serão realizadas as modelagens termodinâmicas dos sistemas ORC, EFGT e Ciclo Rankine a vapor, com objetivo de determinar o quanto da energia dos gases de carbonização pode ser convertido em eletricidade. Será considerada, conforme estabelecido no item anterior, uma potência térmica bruta disponível na UC de 57125 kWt.

Para tanto, foi utilizada uma vazão e composição média de GNC, capaz de suprir esta potência ao grupo gerador, conforme mostrado na Tabela 4.22, com base na composição média de GNG gerados no *cluster* de fornos retangulares.

Tabela 4.22. Vazão de GNC utilizada na modelagem dos ciclos termodinâmicos

CH ₄	CO	H ₂	CO ₂	O ₂	N ₂	Total	
0,026	0,081	0,045	0,147	0,335	1,261	1,895	kmol/s

Aplicando a composição da Tabela 4.23 na Eq.3.18, que avalia a inflamabilidade do gás com o método da TAC, chega-se a um valor de 1,20, maior que a unidade, portanto, indicando que o gás é inflamável nestas condições. A Tabela 4.23 mostra a reação global de combustão a ser considerada, levando em conta a reação estequiométrica dos componentes combustíveis dos GNC.

Tabela 4.23. Equação global de combustão dos GNC.

GNC				Ar			Produtos			
CH ₄	CO	H ₂	CO ₂	+	O ₂	N ₂	→	CO ₂	H ₂ O	N ₂
0,026	0,081	0,045	0,147		0,115	0,433		0,254	0,097	0,433
kmol/s										

Nota-se que o oxigênio que está contido nos GNC (Tabela 4.23) é maior que o necessário para a combustão estequiométrica dos componentes combustíveis do GNC (Tabela 4.24), onde se calcula um coeficiente de excesso de ar (λ) igual a 2,91, de acordo com a Eq. 3.5. Segundo as medições realizadas no queimador da UC, mostradas no item 3.3, os gases atingem o queimador a uma temperatura média de 67 °C, portanto, esta será a temperatura utilizada nos cálculos.

Com esta composição a TAC, calcula pela Eq. 3.9 (Capítulo 3), é de 960 °C, entretanto, considerado que em uma situação não adiabática a temperatura real de chama é de

aproximadamente 85% da TAC (Lackner et al., 2013), estima-se uma temperatura de chama real de 816 °C.

Será considerada também uma importante limitação na UC, à indisponibilidade de água para refrigeração térmica dos ciclos termodinâmicos, portanto, as modelagens serão realizadas considerando o ar atmosférico como dissipador de calor nos ciclos avaliados.

4.3.1. Ciclo Rankine a Vapor

No ciclo Rankine convencional, que usa água como fluido de trabalho, será considerada a utilização de um condensador a ar de ação direta, ou seja, que troca calor diretamente com o vapor que sai da turbina, devido a sua maior eficiência em relação ao método indireto (Milman e Anan'ev, 2016). Desta forma evita-se o uso um circuito de água de refrigeração que faria troca entre o condensador e o fluido de trabalho, neste caso chamado de indireto. Portanto, o vapor sai da turbina e entra na parte superior do condensador, de onde saem tubos aletados, que tem contato com o ar externo insuflado por um ventilador. A água condensada é coletada na parte inferior e bombeada para o circuito de alimentação de água, como mostra a Figura .4.21.

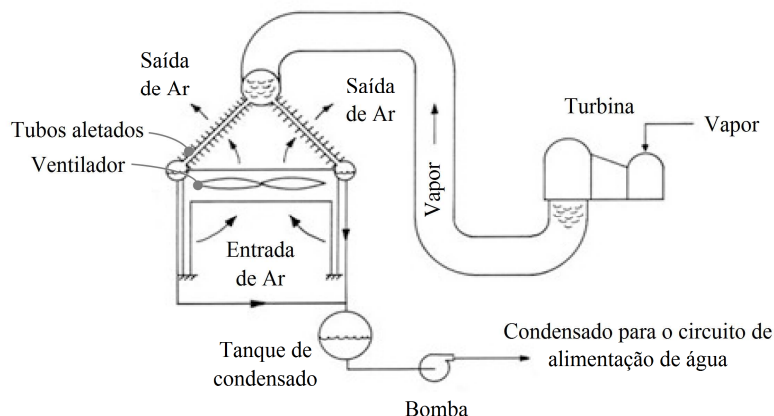


Figura 4.21. Esquema simplificado do condensador a ar de ação direta (Heyns, 2008)

A desvantagem deste sistema está no consumo de energia dos ventiladores, e na maior pressão na saída de vapor da turbina, fatores que podem diminuir a eficiência do ciclo em média de 3 a 10% em relação à refrigeração convencional a água. Em razão da maior temperatura de entrada do ar e do baixo coeficiente de troca de calor do condensador ar, a pressão de

condensação na turbina a vapor é consideravelmente maior, o que reduz a geração de eletricidade. Aproximadamente, a cada 1 psi (~7 kPa) de aumento de pressão perde-se cerca de 0,5% de eficiência na turbina (Tang et al., 2013).

De maneira semelhante, como o aumento da temperatura ambiente influencia negativamente na capacidade de troca de calor no condensador, estes sistemas podem produzir de 10-15% menos energia durante os dias mais quentes do ano, quando a temperatura de condensação e, conseqüentemente, a pressão de condensação, seja substancialmente maior. Isto é exemplificado na Figura 4.22, que mostra a relação entre a pressão de condensação e a temperatura ambiente para diferentes tipos de condensadores.

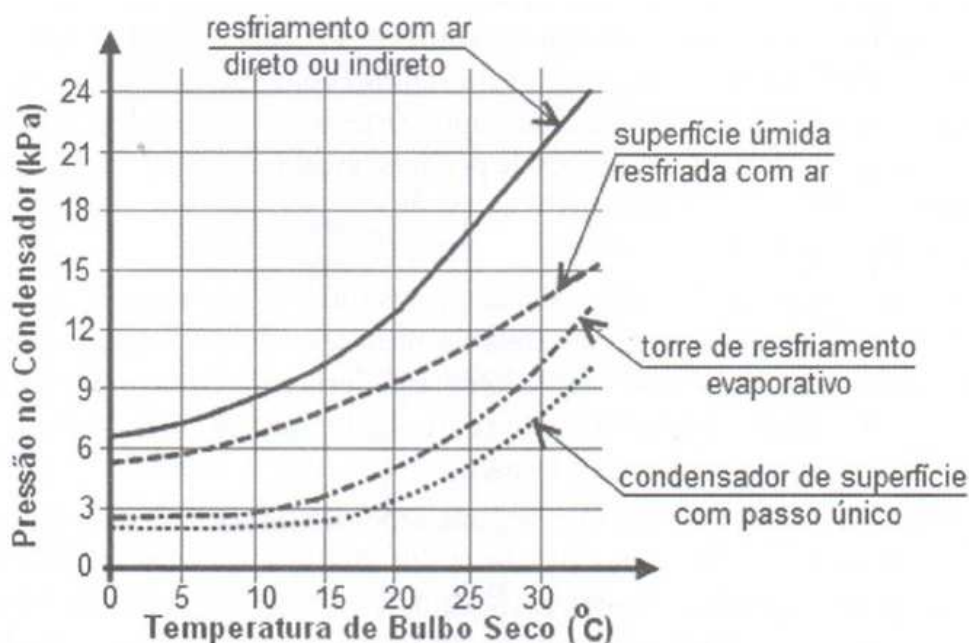


Figura 4.22. Pressão de condensação para diferentes tipos de sistemas de resfriamento em turbinas a vapor (Ballegooyen e Durkin, 2000)

Também, os custos relacionados ao sistema de condensação a ar podem ser de 5 a 10% maiores em relação ao convencional a água. Contudo, o uso de tal solução tem crescido no mundo devido a fatores como a escassez de água e ao alto custo de transporte de combustíveis, quando as jazidas de combustível não estão próximas a uma fonte abundante de água. Por exemplo, a China produz hoje 100 GWe com a tecnologia (Maulbetsch e DiFilippo, 2006).

O ciclo a vapor foi modelado com auxílio do software Gate Cycle®, desenvolvido pela empresa Enter Software Inc. da GE, que tem a finalidade de prever a performance, realizar

balanços de energia, estudos paramétricos, avaliar a eficiência de plantas de potência, como as de ciclo combinado, cogeração, entre outras. O programa utiliza modelos analíticos para análise de processos termodinâmicos, de transferência de calor e mecânica dos fluidos, permitindo modelar uma variedade de esquemas térmicos. Para estimar o consumo e as características do condensador a ar, o modelo da *Hudson Products Corporation* foi utilizado, empresa americana especializada em trocadores de calor e condensadores a ar (Hudson, 2016).

Sabe-se que a eficiência do ciclo a vapor é influenciada pela pressão e temperatura do vapor na entrada da turbina e, em geral, quanto maiores estes valores, mais sofisticado, eficiente e caro é o ciclo, pois, aumentá-los leva invariavelmente ao incremento dos custos de materiais, da caldeira, válvulas, tubulações e turbina.

A eficiência típica do ciclo a vapor varia de menos de 20% a até 45% (podendo ser menor para as pequenas escalas), o que, considerando a potência bruta disponível, resulta em uma potência líquida de 14,8 a 33,3 MW no caso. Considerando esta faixa de potência, no Brasil, a tendência atual das usinas de biomassa aponta para utilização de parâmetros de até 62 bar e 450°C, onde encontra-se como exemplo a usina de Santo Antônio, localizada em Sertãozinho (SP), com 62 bar, 450 °C e 23 MW (ANEEL, 2016a).

Entretanto, a modelagem foi realizada para dois cenários de pressão e temperatura do vapor na entrada da turbina, quais sejam 22 bar / 300 °C e 45 bar / 450 °C, em razão da disponibilidade do mercado, onde foram avaliados os catálogos de produtos das empresas TGM e Texas industrial.

A Figura 4.23 mostra o ciclo desenvolvido no GateCycle®. O fluxos S1 representa o gas da carbonização, os qual é encaminhado para queima na caldeira. O vapor superaquecido (S2) é expandido na turbina a vapor (ST1), gerando trabalho, e o fluxo de vapor de baixa pressão (S3) resultante é encaminhado ao condensador a ar (AC1). A água condensada (S5) é pressurizada na bomba (PUMP2) antes de ser encaminhada ao desareador (DA1), o qual recebe um fluxo de pressão intermediária (S4) extraído da turbina. A água que sai do DA1 é pressurizada na bomba de alta pressão (PUMP1) e então levada pra trocar calor na caldeira, fechando o ciclo.

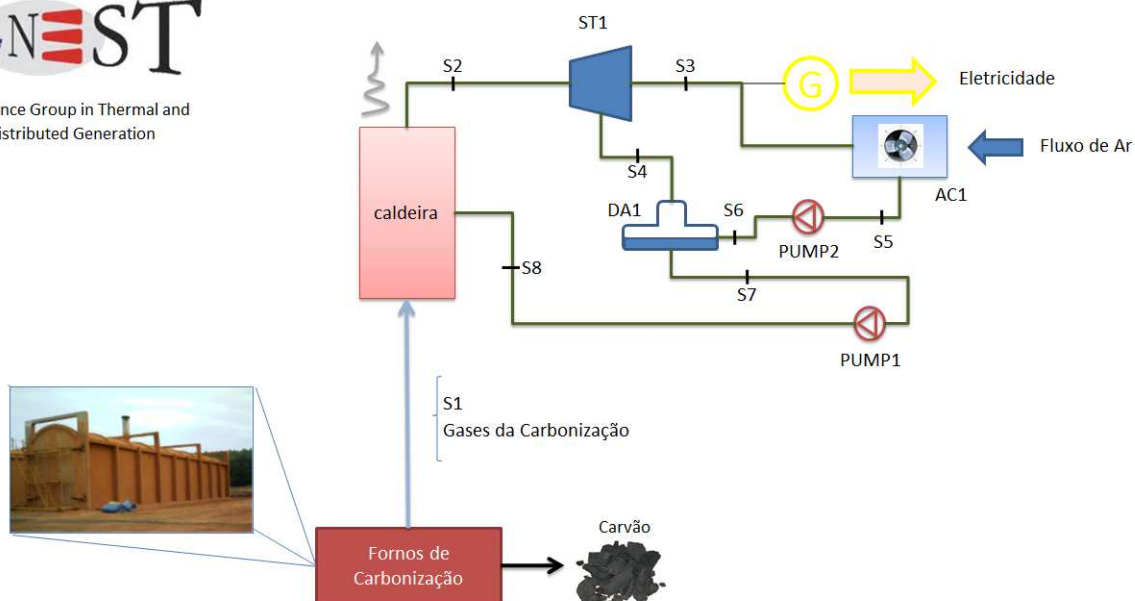


Figura 4.23. Modelagem do ciclo Rankine a vapor

Os principais parâmetros e hipóteses consideradas na modelagem podem ser encontrados a seguir (Gadhamshetty et al., 2006; Rupeshkumar et al., 2011; Srinivas et al., 2011; Lora e Nascimento, 2004). A Tabela 4.24 mostra os resultados da simulação

- 1 – A condição atmosférica é tomada como 24,5 °C e 89.072 Pa;
- 2 – A pressão do condensador a ar é de 15 kPa e no desareador é de 137,9 kPa;
- 3 – A eficiência isentrópica da turbina a vapor é de 82%;
- 4 – A eficiência isentrópica das bombas é de 70%;
- 5 – A eficiência no gerador é de 96%;
- 6 – A eficiência da caldeira é de 85%;
- 7 – A perda de pressão na câmara de combustão, caldeira e condensador foram assumidas em 2% e negligenciadas nos demais equipamentos e tubulações.

O design dos condensadores a ar é baseado na chamada Diferença de Temperatura Inicial (DTI), a qual representa a diferença entre a temperatura do ar na entrada do condensador (temperatura ambiente) e a temperatura no condensador, onde recomenda-se que esta diferença esteja na casa dos 20 °C (Hamanaka et al., 2009). Geralmente, considera-se como temperatura de projeto a temperatura ambiente durante os períodos mais quentes do ano. Para

o caso avaliado, foram utilizados os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2016) da estação mais próxima a UC, localizada em Juramento (MG), a cerca de 10 km da unidade. A temperatura de bulbo seco média do local é de 24,5 °C e a temperatura quente com frequência cumulada normal de 2% é de 32,2°C (de acordo com o critério da ABNT NBR 16401-1 2008). Tomando esta temperatura, calcula-se uma temperatura de condensação de 52,2°C e, conseqüentemente, uma pressão de aproximadamente 15 kPa no condensador.

Tabela 4.24. Resultados da modelagem do ciclo Rankine a vapor.

Caso	Parâmetros		Eficiência	Potência Bruta	Potência Líquida	Consumo Condensador	Consumo Bombas	Perdas Gerador	Vazão de Vapor	Vazão
	P bar	T °C	%	MW	MW	kW	kW	kW	kg/s	t/h
1	45	450	24,0	14,7	13,7	302	116	586	17,5	62,9
2	22	300	20,4	12,5	11,6	328	63	501	19,5	70,2

A eficiência do ciclo variou de 20,4 a 24,0%, de acordo com os parâmetros do vapor na entrada da turbina. A relativa baixa eficiência do ciclo é razão, principalmente, do uso do condensador a ar. Caso fosse considerado o uso de um condensador a água com 10 kPa de pressão, para a mesma situação analisada, a eficiência seria cerca de 12% maior para cada caso avaliado na Tabela 4.25, o que corresponde à média de perda reportada por Tang et al., 2013.

A escolha dos parâmetros de pressão e temperatura, e conseqüentemente da eficiência, irá depender de uma análise técnica e econômica, que deve levar em consideração a disponibilidade de equipamentos no local, custos de capital, investimento e custos de O&M. Geralmente, os maiores gastos de capital e O&M relacionados aos melhores parâmetros, devem ser compensados pelo ganho em eficiência, ou seja, a energia adicional gerada deve pagar estes custos, se não, a escolha de outros parâmetros pode ser uma opção mais lucrativa.

4.3.2. EFGT.

A turbina a gás de queima externa também foi modelada com auxílio do software GateCycle®, para diferentes temperaturas em ciclos com e sem regeneração. O componente crítico neste sistema é o trocador de calor de alta temperatura, que transfere o calor da queima dos gases para o ar comprimido que irá expandir na turbina e gerar trabalho. Quanto maior a temperatura no trocador maior será a temperatura na entrada da turbina e conseqüentemente a eficiência e a potência gerada, entretanto, maiores serão os custos com estes equipamentos.

O projeto dos primeiros trocadores das EFGTs era baseado em tubos metálicos, similares aos utilizados em caldeiras, onde era possível alcançar temperaturas no entorno de 600 a 700 °C na entrada da turbina. Hoje, ligas metálicas especiais com revestimento elevaram este limite para casa dos 700 a 1000 °C. Acima deste valor, as tecnologias não estão estabelecidas técnica e economicamente, sendo requerido o uso de trocadores em estágio de desenvolvimento, como os que utilizam materiais cerâmicos. Além disso, temperaturas acima de 1000 °C requerem a utilização de turbinas com palhetas refrigeradas que possuem alto custo (Pantaleo, 2013; Al-Attab e Zainal, 2015).

Outra limitação dos trocadores está relacionada ao seu tamanho e efetividade, prejudicados pelos baixos coeficientes de troca entre o ar e os gases de combustão. Para garantir coeficientes globais de troca de calor economicamente viáveis, normalmente, deve-se garantir que a diferença entre a temperatura na entrada do trocador e da entrada da turbina, ΔT_q (como mostra a Figura 2.22), fique na ordem de 70 a 150 °C, pois baixos coeficientes levam, invariavelmente, a grandes áreas de troca que inviabilizam economicamente o sistema (Veraa et al., 2011).

Levando em conta estes fatos, a análise foi realizada para três diferentes temperaturas de entrada na turbina: 715, 850 e 900 °C, estabelecendo-se uma diferença de 100°C para a entrada quente no trocador de calor de alta temperatura. A temperatura de 715 °C está no limite dos trocadores metálicos convencionais (~815 °C no trocador). As outras opções de temperatura irão demandar o uso de ligas metálicas especiais como o Inconel (700–1000°C). Exemplos são a microturbina modular da Turbec, modelo T100 (100kW), com o limite de 850 °C na entrada da turbina e a EFGT de 1,8 MW da Mackay Green Energy, com 900 °C (Sunden et al., 2005; Olwa, 2011; Al-Attab e Zainal, 2015).

A Figura 4.24 mostra o ciclo da EFGT sem regeneração desenvolvido no GateCycle®, e a Figura 4.25 o ciclo com regeneração.

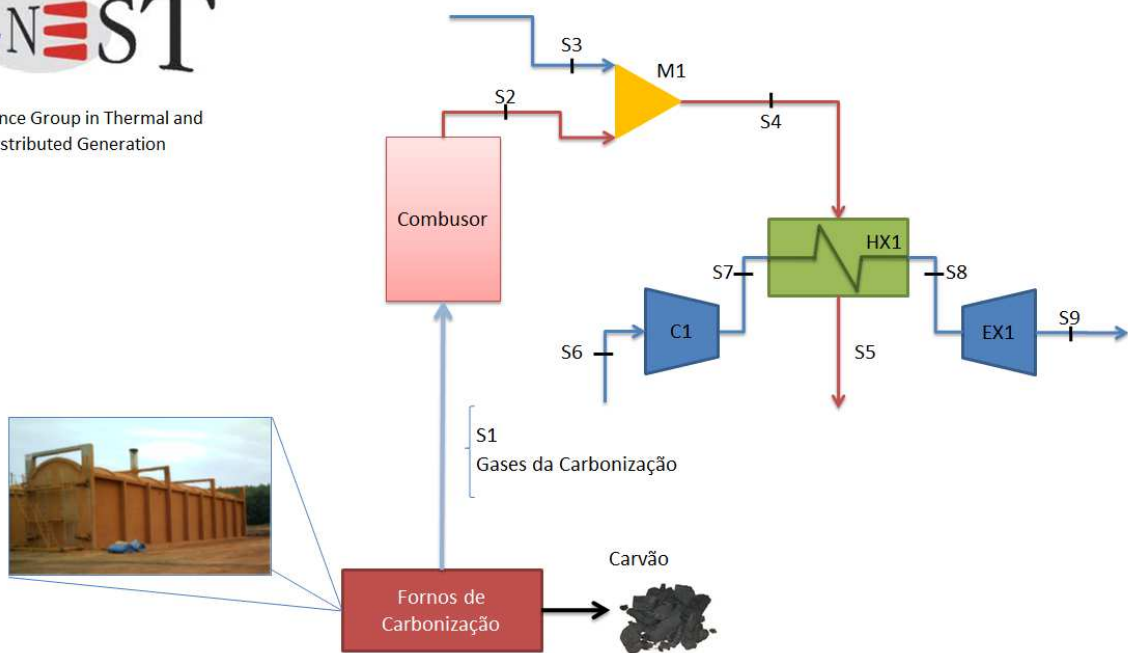


Figura 4.24. Modelagem do ciclo EFGT sem regeneração

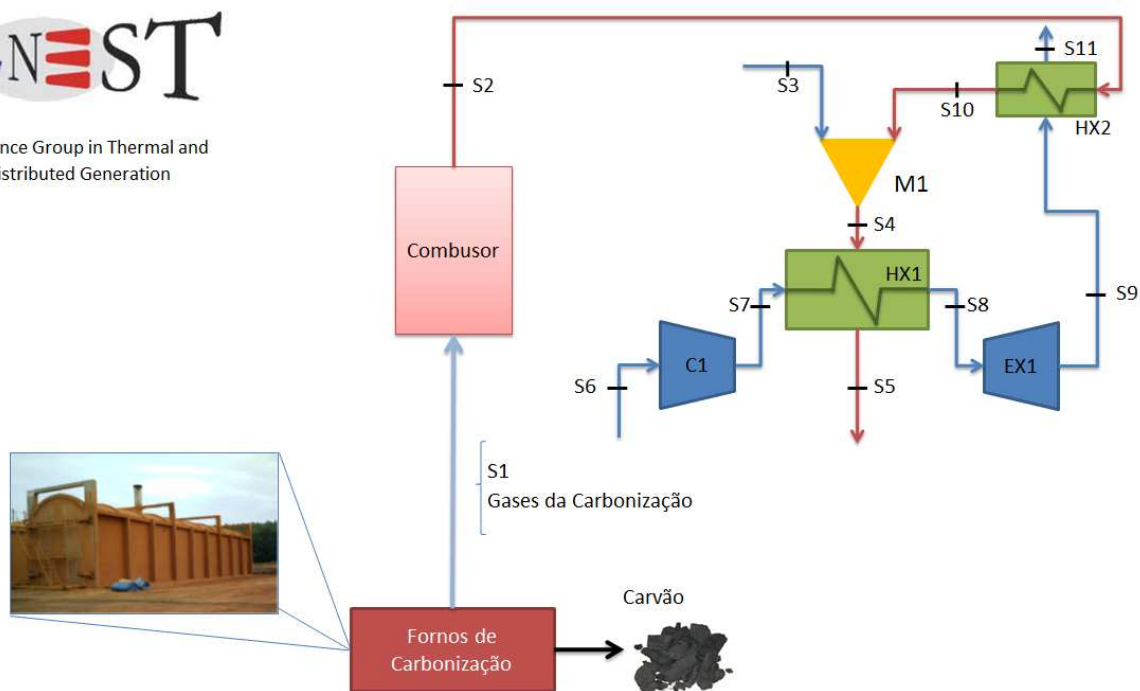


Figura 4.25. Modelagem do ciclo EFGT com regeneração

Nas Figuras 4.24 e 4.25, em ambos os casos o Fluxos S1 representa o gás de carbonização que deixa os fornos. No caso do ciclo sem regeneração eles são direcionados diretamente ao combustor, já no caso do ciclo com regeneração eles são antes aquecidos no trocador HX

pelos gases quentes que saem da turbina, S9. Os gases da combustão (S2) são encaminhados ao misturador M1, que usa o fluxo de ar ambiente (S3) para controlar a temperatura do fluxo S4, o qual é levado ao trocador de alta temperatura HX1. O ar comprimido (S7) que sai do compressor (C1) troca calor no HX1 e é expandido na turbina (EX1). No caso do ciclo com regeneração os gases de exaustão da turbina (S9) são encaminhados ao trocador secundário HX2.

O ciclo foi modelado para as condições ambientes locais, 24,5°C e 89.072 kPa. A eficiência isentrópica do compressor é 85% e da turbina de 88%. A efetividade dos trocadores foi assumida em, no máximo, 90% e com perdas de pressão de 2 kPa. Dados baseados nos estudos de Baina et al. (2015), Al-Attab e Zainal (2015), Pantaleo (2013), Mello e Monteiro (2012) e Sunden et al. (2005).

Normalmente, nas EFGTs com regeneração, os gases que saem da Turbina S9 são utilizados como ar de combustão, o que diminui a necessidade de combustível e aumenta a eficiência do ciclo. No entanto, esta estratégia não pode ser utilizada para os gases de carbonização, pois este já sai dos fornos pré-misturado com ar de combustão. Deste modo, o meio encontrado para aproveitar a energia dos gases de exaustão da turbina foi o emprego de um trocador de calor secundário (HX2), com a função de fazer a troca de calor entre os gases de carbonização e o fluxo S9. Para o ciclo com regeneração a temperatura máxima de aquecimento dos gases de carbonização foi estabelecida em 350 °C no trocador secundário.

A Razão de Pressão (RP) no compressor foi estabelecida através de um estudo paramétrico, o qual mostrou que existe um valor ótimo de RP para cada temperatura de entrada na turbina e situação avaliada, com e sem regeneração. Este estudo é mostrado na Figura 4.26.

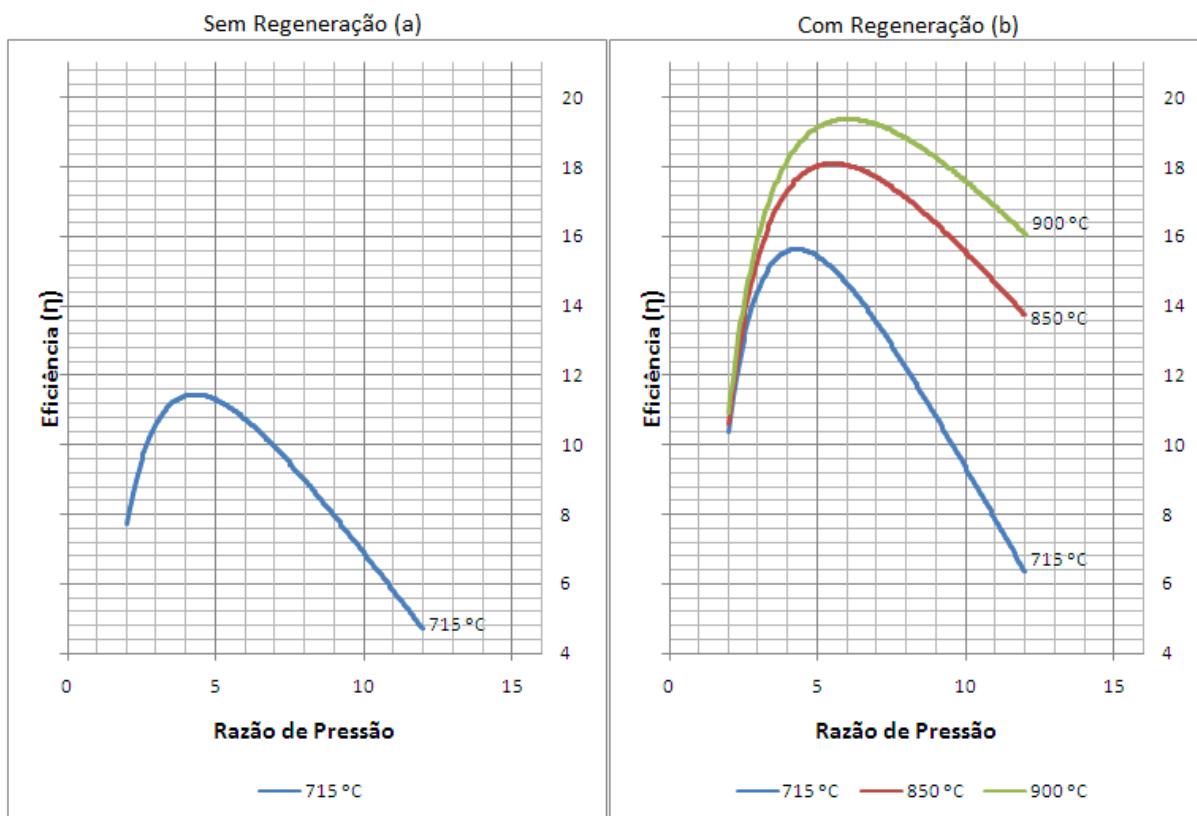


Figura 4.26. Variação da eficiência do ciclo EFGT em função da RP do compressor para diferentes temperaturas de entrada na turbina, no ciclo sem regeneração (a) e com regeneração(b).

Devido ao fato de a diferença de temperatura quente (ΔT_q) do trocador de calor de alta temperatura (HX1), entre os fluxos S4 e S8, estar estabelecida em 100 °C (Veraa et al., 2011) e, considerando a temperatura de chama de 816 °C (ver início da seção 4.3), inviabiliza-se a situação onde as temperaturas de entrada na turbina são de 850 e 900 °C para o caso do ciclo sem regeneração. Como no ciclo com regeneração a temperatura do gás de carbonização é elevada para 350 °C (através do pré-aquecimento no trocador HX2), a temperatura de chama no caso sobe para 1011 °C, tornando possível o uso das opções com maior temperatura de entrada na turbina.

Como pode ser observado na Figura 4.26, para uma dada razão de pressão, a eficiência do ciclo aumenta com o incremento da temperatura na entrada da turbina. Já a razão de pressão produz um valor ótimo de eficiência para cada temperatura avaliada. Em um ciclo convencional, de queima direta, a eficiência aumenta com a RP e começa a cair apenas para altas pressões quando a redução de potência se torna maior que a redução na entrada de calor do ciclo. Porém, nas EFGTs, o aumento na temperatura do ar comprimido (S5), causada pelo

aumento na RP do compressor, diminui a eficácia do trocador de calor de alta temperatura devido à diminuição da diferença de temperatura entre S5 e S9, colaborando para diminuir a eficiência do ciclo, e fazendo com que a RP ótima de uma EFGT seja menor se comparada a uma turbina de queima direta com os mesmos parâmetros. Esta condição já foi verificada em diversos estudos que tratam sobre EFGT (Cocco et al., 2006; Kautz e Hansen, 2007; Datta et al., 2010; Camporeale et al., 2015). Para exemplificar esta situação, a Figura 4.27 mostra a variação da eficiência do ciclo e da efetividade do trocador de calor em função da RP no compressor, quando são mantidos constantes a temperatura na entrada da turbina (715°C), a vazão de ar (77,5 kg/s) e o fluxo S16 (815 °C).

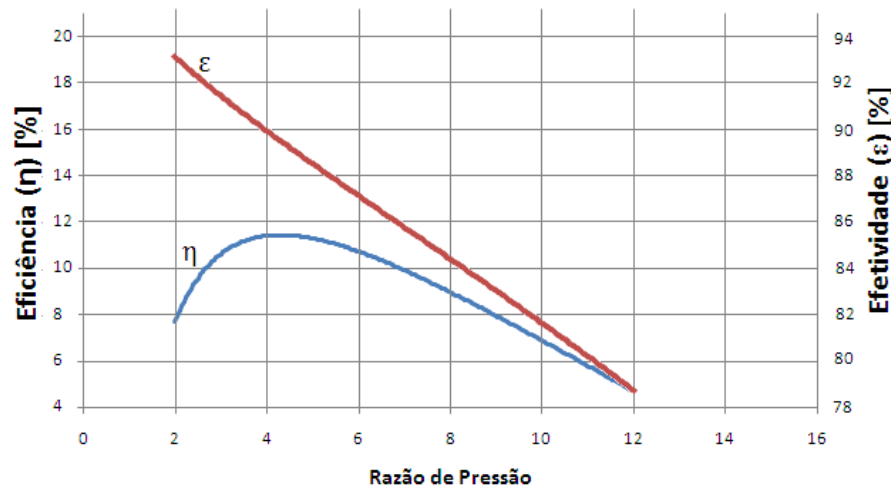


Figura 4.27. Relação entre razão de pressão, eficiência (η) e efetividade (ϵ) do trocador de calor de alta temperatura para o ciclo EFGT sem regeneração a 715 °C.

Para o caso da Figura 4.27 a efetividade é definida automaticamente pelo gatecycle®, a qual é estabelecida para manter a temperatura requerida na entrada da turbina. Como o incremento da RP aumenta a temperatura na saída do compressor, diminui-se a efetividade no trocador, sendo que sua área de troca é mantida constante.

A Tabela 4.25 mostra os resultados para os ciclo com e sem regeneração nas diferentes temperaturas de entrada na turbina consideradas.

Tabela 4.25. Resultados da modelagem da EFGT

	T_{ET} °C	RP	Pot _{ele} MW	η %	m_{Ar} kg/s
Sem regeneração	715	4,3	6,5	11,4	77,5
	715	4,3	8,9	15,6	108,2
Com regeneração	850	5,5	10,3	18,1	82,9
	900	6,5	11,0	19,3	77,9

$T_{e,t}$: temperatura na entrada da turbina; RP: Razão de Pressão no compressor; η : eficiência do ciclo; m_{ar} : fluxo mássico de ar no ciclo.

Para o ciclo sem regeneração a potência elétrica é de 6,5 MW, já para o ciclo com regeneração a potência varia de 8,9 a 11 MW de acordo com a T_{ET} . Nota-se que a RP é função da temperatura da turbina, deste modo, para o caso de T_{ET} igual a 715 °C, é preciso aumentar a vazão de ar para atingir uma maior potência para o ciclo com regeneração. Para cada análise individual, este fluxo é definido em função da efetividade do trocador de calor (mantida em 90%), já que os parâmetros que poderiam influenciá-lo são mantidos constantes (RP, T_{ET} , e o *input* de energia (fluxo S9 e S16 nas figuras 4.24 e 4.25, respectivamente).

Sendo a temperatura e a pressão na entrada da turbina constantes, quanto mais ar passa por ela maior será a potência gerada. Entretanto, um incremento da vazão significa que mais ar comprimido deve ser aquecido no trocador de calor, portanto, mais energia deve ser transferida por ele, o que consequentemente, deve ser realizado pelo aumento de sua área de troca o que aumenta consequentemente sua efetividade. A transferência de energia máxima ocorre quando o trocador apresenta efetividade igual a 100 %, o que, porém, é inviável do ponto de vista técnico e econômico, já que seria necessário uma área de troca infinita no equipamento. Deste modo, o fator determinante na definição da vazão do ciclo é a efetividade do trocador de calor, a qual foi estabelecida em 90%.

O aumento na razão de pressão irá influenciar positivamente na área do trocador de calor e na espessura dos tubos. Primeiro, porque o aumento na temperatura do ar na saída do compressor irá afetar negativamente a troca de calor nos tubos (Em razão da menor diferença de temperatura entre S5 e S16, na Figura 4.25), o que irá solicitar maior área de troca e, segundo, uma maior pressão requer tubos mais resistentes no trocador, portanto, mais espessos. Ou seja, o aumento na RP irá aumentar os custos com o trocador (Mello e Monteiro, 2012).

No ciclo com regeneração, poder-se-ia melhorar a eficiência aumentando a temperatura de pré-aquecimento dos gases de carbonização, através do incremento na troca de calor nos trocador secundário. Contudo, isto amplia o risco do sistema, pois, sendo um combustível pré-

misturado com o ar, existe a possibilidade de ignição dos gases antes de chegar no combustor, pelo efeito de retorno de chama ou autoignição, como foi reportado na planta experimental da Arcelor Mittal (Item 2.4.1), principalmente quando os gases se apresentarem com maior poder calorífico. Encontrar um ponto ótimo de aquecimento, com base na eficiência e na segurança, irá depender do avanço do conhecimento acerca das características combustíveis dos gases de carbonização.

Devido a sua maior eficiência considera-se como melhor opção o caso da EFGT o ciclo com regeneração e T_{ET} de 900 °C.

4.3.3. ORC.

Diferente das EFGTs, atualmente, esta tecnologia possui um bom grau de maturidade. Os principais fornecedores do equipamento são a Turboden, com 45% do mercado, a Ormat, com 24% e a Maxxtec com 23%, com diversos sistemas de ORC com biomassa em funcionamento e eficiências elétricas no entorno de 10 a 27 %, com ou sem cogeração (Quoilin et al., 2013).

Diversos fluidos orgânicos podem ser aplicados nos ORCs, sendo que esta decisão tem grande influência no desempenho do sistema, entretanto, deve-se avaliar suas restrições, relacionadas às propriedades termodinâmicas, aspectos ambientais e segurança. Em geral, procura-se fluidos com alta pressão e temperaturas crítica, o que favorece o desempenho termodinâmico, e alto calor de latente vaporização, para beneficiar a troca de calor no evaporador (Sotomonte, 2015).

Hoje, o fluido mais comum nas aplicações de ORC é o octametiltrisiloxano (MDM), também, o mais utilizado nas plantas comerciais de larga escala (>1MW), tendo a vantagem de se atóxico e possuir baixo GWP e ODP (Prando et al., 2015). Entretanto, segundo Drescher e Brüggemann (2007), que avaliaram diversos fluidos para o aproveitamento de fontes de alta temperatura, a família de alquilbenzenos apresentam as maiores eficiências termodinâmicas neste caso.

A Figura 4.28 mostra o modelo simplificado do sistema ORC que utiliza os gases de carbonização para a geração de eletricidade. Os gases da carbonização (S1) são encaminhados a uma caldeira de óleo térmico, onde ocorre a troca de calor com o óleo térmico frio (O2). O óleo aquecido na caldeira (O1) é levado ao evaporador para evaporar o fluido de trabalho (F6) que sai do regenerador, gerando o fluxo (F1) que é então levado ao expensor, produzindo trabalho e o fluxo F2 de baixa pressão, o qual é encaminhado a um regenerador. Este

equipamento tem a função de recuperar o calor de F2 para pré aquecer o fluxo condensado F5 que sai da bomba. O Fluxo F3 que sai do regenerador é condensado no condensador pelo fluxo de ar (A1), gerando o fluxo F4 que é então encaminhado à bomba, fechando o ciclo.

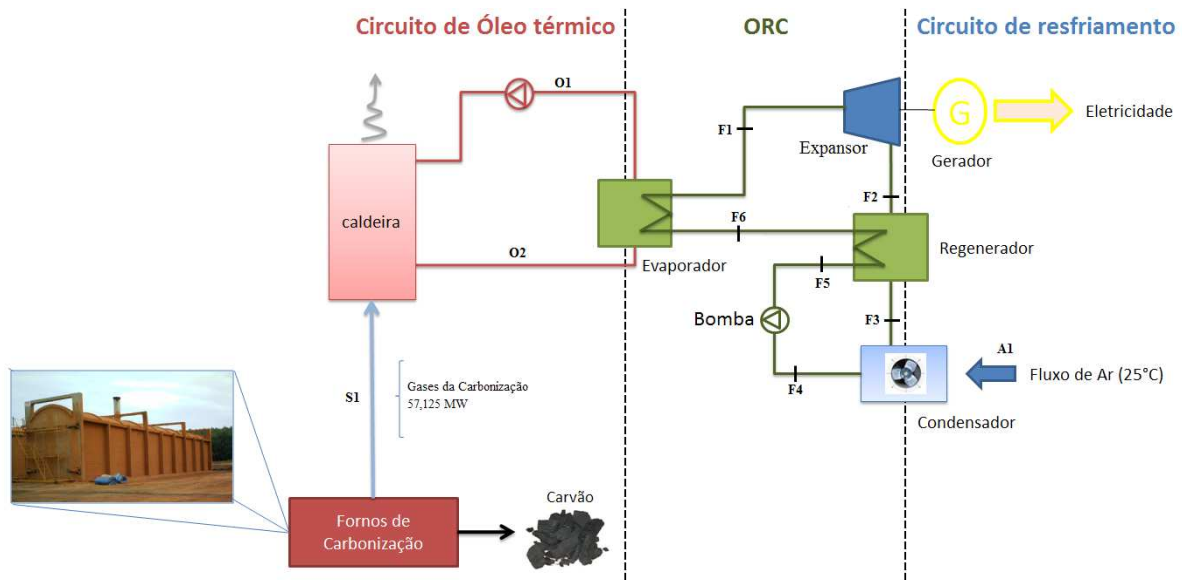


Figura 4.28. Uso dos gases de carbonização no ciclo ORC

Além de controlar a temperatura do fluido para valores seguros (abaixo da temperatura crítica ou de projeto), a utilização do óleo térmico apresenta outras vantagens, tais como inércia térmica, boa capacidade de suportar mudanças de carga, e a possibilidade de chegar à temperatura de trabalho próximo à pressão atmosférica.

As seguintes considerações e limitações foram utilizadas no modelo termodinâmico:

- [1] Trocadores de calor de contracorrente foram utilizados no condensador, evaporador e regenerador, com perdas de pressão de 2%, e uma diferença de temperaturas inicial e terminal mínimas aceitáveis de 10 K no evaporador (Guo et al., 2011; Campos et al., 2013);
- [2] As diferenças de temperatura terminais no regenerador foram estabelecida em, no mínimo, 5 K;
- [3] A eficiência da caldeira de óleo térmico é de 85%, sendo as temperaturas de entrada e saída do óleo no evaporador de 310 e 210 °C, respectivamente. Utiliza-se como fluido o TherminolVP-1 (Consideraram-se os valores típicos de módulos ORCs usados em para fontes de alta temperatura – Tuboden, 2016; Aqylon, 2016,);

- [4] Grau de 0 a 50 K de superaquecimento no evaporador e de 5 K e de sub-resfriamento no condensador a ar, o qual possui temperatura mínima de condensação de 52,2 °C, considerando um DTI de 20°C e a temperatura ambiente máxima de 32,2 °C (Saini et al., 2015; Nusiaputra et al., 2014; He et al., 2014);
- [5] A pressão mínima no condensador é de 5 kPa (Fernández et al., 2011; Drescher e Bruggemann, 2007)
- [6] Eficiência isentrópica de 75% na turbina e 70% na bomba (Branchini et al., 2013; Declaye et al., 2013)
- [7] Eficiência do gerador elétrico de 96%;
- [8] Efetividade máxima do regenerador e evaporador de 90% (Quoilin et al., 2010);
- [9] Demais perdas térmicas do sistema foram desconsideradas.

O ciclo foi modelado em Excel[®] com auxílio dos modelos de correlação e predição das propriedades termodinâmicas dos fluidos, disponíveis na plataforma livre Coolprop[®], desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Liège (Bélgica) e da Universidade Técnica da Dinamarca (Bell et al., 2014).

Equações de balanço de massa e energia foram utilizadas para descrever o desempenho de cada componente no ciclo, para fornecer o ponto de operação em estado estacionário para os casos avaliados, onde parte-se da hipótese de trabalho em regime permanente e considerando desprezíveis as variações de energia cinética e potencial ao longo do sistema (Branchini et al., 2013; Sotomonte, 2015).

O ponto de partida para o ciclo ORC é a fonte de calor, que influenciará diretamente nos demais componentes do ciclo. O calor fornecido ao ciclo pela fonte é calculado utilizando a equação 4.24.

$$\dot{Q}_{\text{fon}} = \dot{m}_{\text{fon}} (\bar{h}_e - \bar{h}_s) \quad (4.24)$$

em que,

h_e e h_s representam a entalpia do fluido da fonte de calor na entrada e saída do evaporador, respectivamente;

Q_{fon} = Calor da fonte adicionada ao ciclo;

m_{fon} = fluxo da fonte de calor;

O evaporador foi modelado como um trocador de calor em contracorrente onde é realizada a transferência de calor ao fluido de trabalho, a qual é dividida nas etapas de preaquecimento, evaporação e superaquecimento. O trocador é limitado pelas diferenças de temperatura terminal e inicial mínimas aceitáveis no trocador, ou seja, pela diferença entre a entrada do fluido de trabalho (T_{F6}) e a saída do fluido da fonte de calor (T_{O2}), e a saída do fluido de trabalho (T_{F1}) e a entrada do fluido da fonte de calor (T_{O1}), respectivamente. A Eq. 4.25 mostra o balanço de energia neste equipamento.

$$\dot{Q}_{\text{evp}} = \dot{m}(\bar{h}_1 - \bar{h}_{l,\text{sat}}) + \dot{m}(\bar{h}_{l,\text{sat}} - \bar{h}_6) \quad (4.25)$$

Em que,

$h_{l,\text{Sat}}$ = entalpia no ponto de saturação;

Q_{evp} = Calor adicionado ao ciclo no evaporador;

$\dot{m}$ = fluxo do fluido de trabalho;

Após ter sua temperatura elevada no evaporador, o fluido é encaminhado a turbina onde realiza trabalho. Seu desempenho foi estabelecido em função de sua eficiência isentrópica, a qual é definida pela Eq. 4.26:

$$\eta_{\text{is,t}} = \frac{\dot{W}_{\text{real}}}{\dot{W}_{\text{is}}} = \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_2}{\bar{h}_1 - \bar{h}_{2,s}} \quad (4.26)$$

Em que,

$\eta_{\text{is,t}}$ = Eficiência isentrópica da turbina;

$W_{\text{real,t}}$ = trabalho real realizado pela turbina;

$W_{\text{is,t}}$ = trabalho isentrópico realizado pela turbina;

A energia do fluido que sai da turbina é parcialmente recuperada através do uso de um trocador interno de calor (regenerador), o qual tem a função de realizar o aquecimento preliminar do fluido de trabalho. Seu desempenho é limitado por sua efetividade e pelas

diferenças de temperatura terminal e inicial, definidos pela Eq. 4.27. Seu balanço de energia é mostrado na Eq. 4.28.

$$\varepsilon_{\text{reg}} = \frac{\dot{Q}_{\text{reg}}}{\dot{Q}_{\text{max}}} = \frac{\dot{m}C_{p,\text{liq}}(T_6 - T_5)}{\dot{m}C_{p,v}(T_2 - T_5)} \quad (4.27)$$

$$\dot{Q}_{\text{reg}} = \dot{m}(\bar{h}_2 - \bar{h}_3) = \dot{m}(\bar{h}_6 - \bar{h}_5) \quad (4.28)$$

em que,

ε_{reg} = efetividade do regenerador;

$\dot{Q}_{\text{reg}}$ = calor regenerado;

O fluido ao sair do regenerador é encaminhado ao condensador, o qual também é modelado como um trocador de calor em contracorrente. Sua pressão é determinada em função da temperatura de condensação T_4 . Seu balanço de energia é definido pela Eq. 4.29

$$\dot{Q}_{\text{con}} = \dot{m}(\bar{h}_3 - \bar{h}_4) \quad (4.29)$$

em que,

$\dot{Q}_{\text{con}}$ = calor rejeitado pelo condensador

Da mesma forma que a turbina, a bomba é modelada em função da eficiência isentrópica, sendo seu balanço definido pela Eq. 4.30 e o trabalho consumido pela Eq. 4.31.

$$\eta_{\text{is,b}} = \frac{\bar{h}_{5,s} - \bar{h}_4}{\bar{h}_5 - \bar{h}_4} \quad (4.30)$$

$$\dot{W}_b = \dot{m}(\bar{h}_5 - \bar{h}_4) \quad (4.31)$$

em que,

$\eta_{\text{is,b}}$ = Eficiência isentrópica da bomba.

$\dot{W}_b$ = trabalho consumido pela bomba

Foram selecionados os fluídos utilizados comercialmente, especificamente aqueles com altas temperaturas críticas, e recomendados para a o uso de fontes de calor de alta temperatura: n-Pentano, Tolueno e o MDM (Maraver et al., 2014). As pressões e temperaturas críticas destes fluídos encontram-se na Tabela 4.26.

Tabela 4.26. Parâmetros termodinâmicos dos fluidos orgânicos selecionados

Fluído	Tc	Pc
	[K]	[kPa]
n-Pentano	470	3370
Octametiltrisiloxano (MDM)	564	1415
Tolueno	592	4126

O sistema foi avaliado considerando variações de pressão, superaquecimento, efetividade dos trocadores e vazão do fluído de trabalho, isto para cada fluído em questão, obedecendo às limitações impostas anteriormente. Primeiro é realizada uma análise paramétrica para verificar os efeitos na eficiência do ciclo em relação ao aumento da pressão e do superaquecimento do fluído na entrada da turbina, seus resultados podem ser observados na Figura 4.29 para o Tolueno.

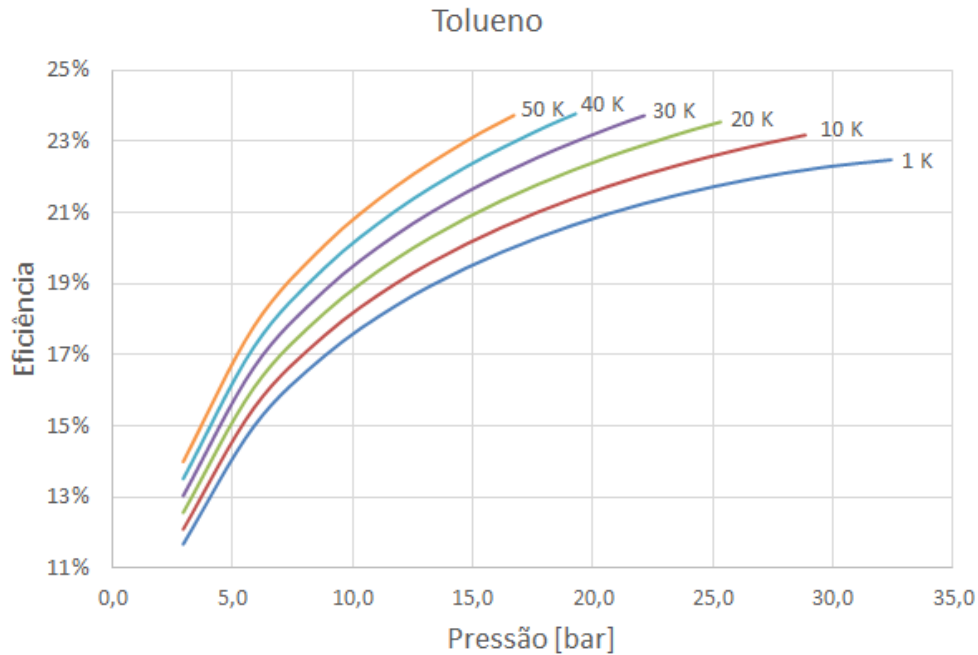


Figura 4.29. Variação da eficiência do ciclo ORC em relação à pressão de trabalho e o nível de superaquecimento para o Tolueno.

Na Figura 4.29 nota-se que, assim como no ciclo Rankine a vapor, o incremento da pressão na entrada da turbina leva a uma melhora contínua na eficiência do ciclo. O mesmo efeito é notado quando aumenta-se o nível de superaquecimento, entretanto, pode-se observar também que quanto maior o nível de superaquecimento menor é a pressão máxima que pode ser alcançada. Isto ocorre pois a temperatura máxima do ciclo está limitada à temperatura crítica do fluido de trabalho e, como o aumento da pressão leva também ao aumento da temperatura na saída do evaporador, quanto maior o nível de superaquecimento menor é a pressão máxima, limitando os ganhos com o superaquecimento.

Poder-se-ia concluir que o superaquecimento é sempre favorável a eficiência do ciclo, porém, diferente do ciclo Rankine convencional, este efeito ocorre somente porque ele permite o aumento na quantidade de calor recuperado pelo regenerador pois, como o superaquecimento aumenta a temperatura de saída na Turbina (T_{F2}), amplia-se a diferença de temperatura terminal no equipamento ($T_{F2}-T_{F6}$), limitada a 5K (consideração [2]), o que por sua vez possibilita o aumento de sua efetividade e consequentemente da eficiência do ciclo.

Por exemplo, mantendo-se a efetividade do regenerador constante a medida que se aumenta o superaquecimento nota-se, na realidade, uma leve diminuição na eficiência do ciclo. Isto pode ser observado na Figura 4.30, onde manteve-se a efetividade do regenerador a 33%, a pressão

a 15 bar e variou-se apenas o grau de superaquecimento, tendo novamente o Tolueno como fluido de trabalho.

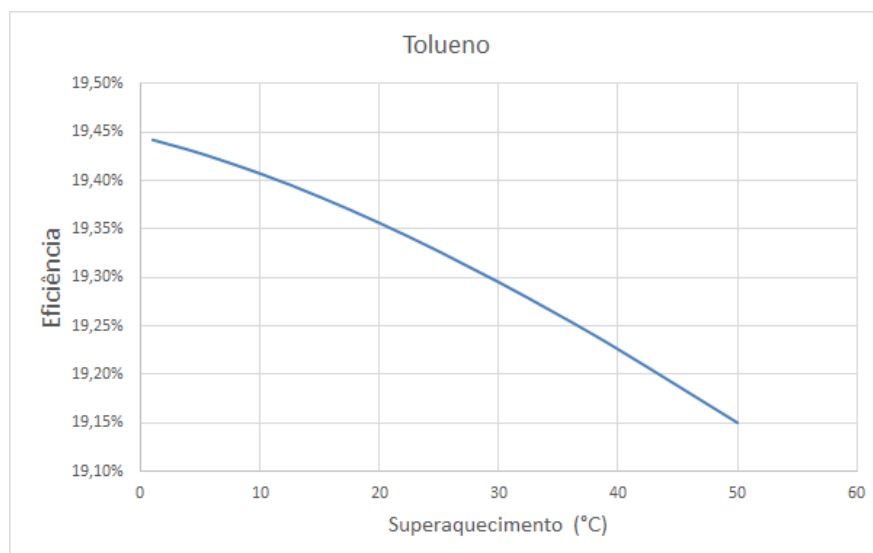


Figura 4.30. Variação da eficiência do ciclo ORC em relação à pressão de trabalho e o nível de superaquecimento.

As razões pela qual o superaquecimento é geralmente considerado na análise do ciclo Rankine é a de que fluidos úmidos (como a água) necessitam de um grau de superaquecimento para evitar a condensação no final da expansão (o que prejudica a vida útil da turbina) e, também, pelo aumento na diferença de entalpia neste processo, aumentando a potência gerada. Entretanto, como os três fluidos analisados são secos, a formação de condensado no final da turbina não é um problema, além disso, observa um efeito negativo na eficiência do ciclo com o aumento do superaquecimento, como pode ser notado na Figura 4.30. Esta queda de eficiência já foi observada em diversos estudos: Soltani et al., 2015; Kim e Ko, 2012; Rowshanzadeh, 2011; Shao, 2011; Saleh et al. 2007; Drescher e Brüggemann, 2006. Como a energia disponibilizada pela fonte de calor é constante no modelo, superaquecer o fluido significa reduzir a vazão de fluido do sistema, já que a energia gasta no superaquecimento será retirada do processo de evaporação, portanto, diminuindo a massa de fluido evaporado. O que ocorre é que o ganho de energia devido ao aumento na diferença de entalpia na turbina não é suficiente para compensar a perda de energia ocasionada pela perda de massa de fluido evaporado. Deste modo, o superaquecimento acaba por reduzir a eficiência do ciclo.

O efeito positivo do superaquecimento notado na Figura 4.29, ocorre em especial devido a presença do recuperador interno de calor, o que já foi notado na pesquisa de Saleh et al. (2007), em razão da possibilidade de aumento da recuperação de calor no regenerador.

A análise paramétrica para o n-Pentano pode ser observada na Figura 4.31, onde nota-se que o comportamento das curvas de eficiência é semelhante ao do Tolueno, onde observa-se uma aumento da eficiência com o aumento da pressão e do grau de superaquecimento. Nas curvas de 40 e 50 K observa-se um comportamento abaixo do esperado, pois o superaquecimento ocasiona uma maior proximidade entre a temperatura de saturação no evaporador e a temperatura de entrada (T_{F6}), limitando a efetividade tanto do regenerador quanto do evaporador e prejudicando a eficiência do ciclo.

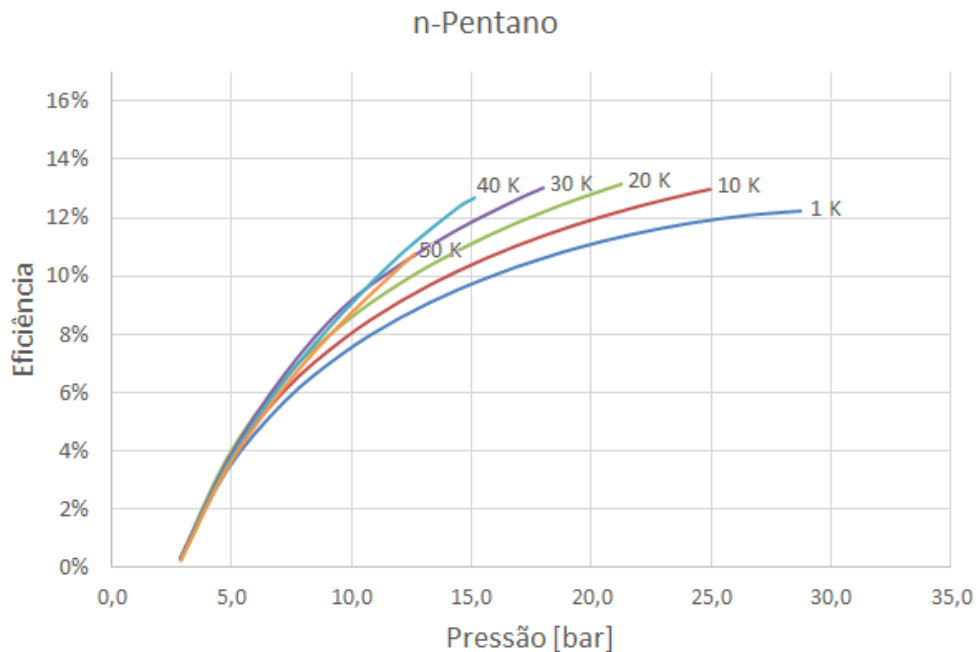


Figura 4.31. Variação da eficiência do ciclo ORC em relação à pressão de trabalho e o nível de superaquecimento para o n-Pentano.

A análise paramétrica para o MDM pode ser observada na Figura 4.32. Neste caso, as curvas de aumento de pressão mostram um ponto de ótimo, onde é atingida a maior eficiência para cada nível de superaquecimento. Isto ocorre pois, a partir de um certo nível de pressão, a temperatura de entrada no evaporador (T_{F6}) passa a ficar muito próxima da temperatura de saída do óleo térmico (T_{O2}), e como esta diferença está limitada a 10 K (Consideração [1]), deve-se diminuir a efetividade do regenerador, o que por sua vez influi negativamente na eficiência do ciclo. Esta limitação passa a ser mais crítica quando aumenta-se o grau de

superaquecimento do ciclo, fazendo com que o ciclo com apenas 1 k apresente a melhor eficiência para o caso

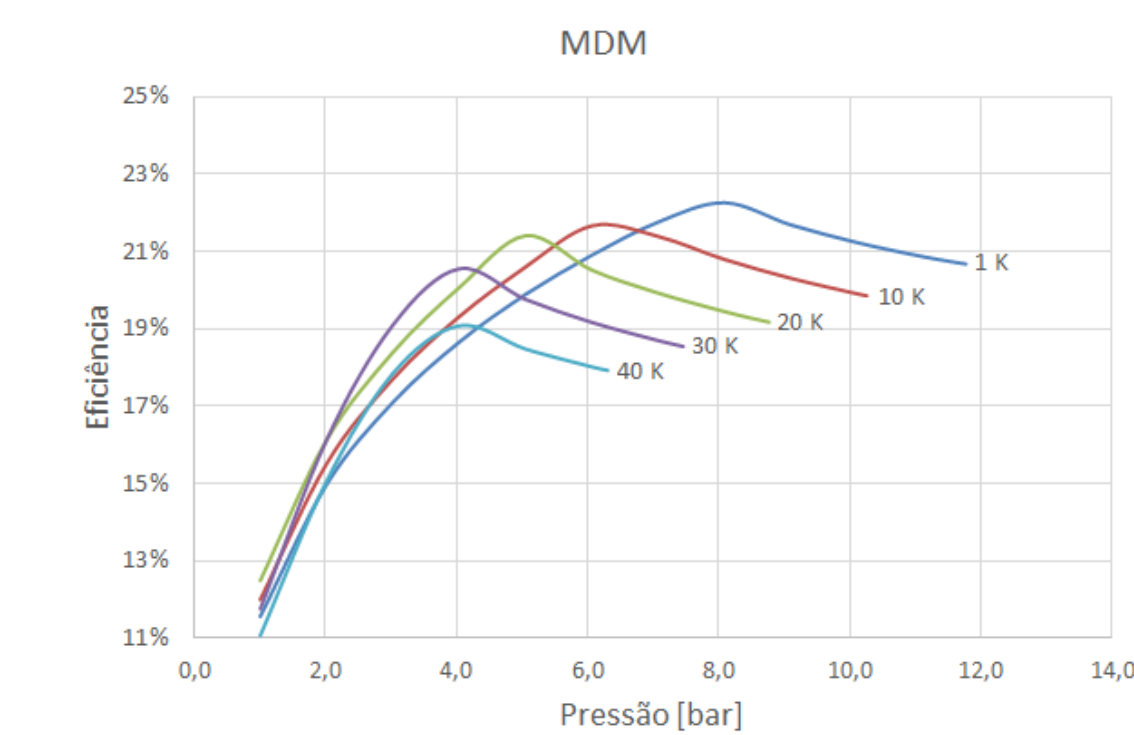


Figura 4.32. Variação da eficiência do ciclo ORC em relação à pressão de trabalho e o nível de superaquecimento para o MDM.

Os resultados finais da modelagem do ORC para os diferentes fluídos de trabalhos são listados na Tabela 4.27, considerando os parâmetros de operação com melhor eficiência.

Tabela 4.27. Resultados da modelagem do ciclo ORC.

Fluído	Eficiência	Potência	Vazão	Parâmetros						Consumo
	%	MW		P _{F1} bar	P _{F4} bar	T _{F1} °C	T _{F4} °C	ε _{reg} %	SUP K	Condensador* kW
MDM	20,6	11,8	192	11,7	0,05	280	61,5	62,5	1	226
Tolueno	23,7	13,5	97	22,1	0,17	300	52,8	45,8	30	349
n-Pentano	13,0	7,4	127	18,0	2,00	187	52,6	42,1	30	759

*Consumo de potência pelos ventiladores no condensador / ε_{reg} = Efetividade do regenerador / SUP = superaquecimento

Considera-se como melhor opção para o caso analisado o uso do Tolueno como fluido de trabalho, por este apresentar a melhor eficiência. A Turboden disponibiliza no mercado um módulo ORC para altas temperaturas de 15 MW com eficiência semelhante (Turboden, 2016).

4.3.4. Comparação Entre as Tecnologias e Análise Econômica

Nesta etapa será realizada uma avaliação preliminar da viabilidade econômica da utilização dos gases residuais da carbonização para a geração de eletricidade, com objetivo de comparar as tecnologias estudadas nos itens anteriores, ORC, EFGT e ciclo Rankine a vapor. O estudo também terá por base a UC de Itacambira da Plantar Siderúrgica. A Tabela 4.28 resume os resultados obtidos para os três diferentes ciclos termodinâmicos avaliados nesta seção, considerando as maiores eficiências obtidas para cada caso.

Tabela 4.28. Resultados da modelagem dos ciclos termodinâmicos.

	Eficiência %	Potência MWe	Observações
ORC	23,7	13,5	Tolueno como fluido de trabalho
Ciclo Rankine a vapor	24,0	13,7	Parâmetros de 45 bar e 450 °C do vapor na entrada da turbina
EFGT	19,3	11,0	900 °C de temperatura do ar na entrada da turbina

A estimativa de produção de carvão no *cluster* é de 5515 t de carvão seco (descontado sua umidade média de 3,8%, conforme a Tabela 4.2 a cada 18 dias para os 120 fornos do *cluster*. Neste intervalo serão produzidos 5249, 5327 e 4277 MWh, considerando o uso das tecnologias ORC, ciclo Rankine a vapor e EFGT, respectivamente. Isto resulta em uma produtividade específica de eletricidade de 0,952 MWh/t_{carvão} para o ORC, 0,966 MWh/t_{carvão} para o ciclo Rankine a vapor e 0,775 MWh/t_{carvão} para a EFGT.

Na Tabela 4.29 é apresentado o total de energia a ser comercializada anualmente para as tecnologias consideradas, levando em conta o consumo interno da UC, reportado pela Plantar, e um fator de capacidade de 90% (Teixeira et al., 2013; Arvay et al., 2011; Carrara, 2011).

Tabela 4.29. Balanço da geração de eletricidade anual do Empreendimento.

Tecnologia	ORC	Ciclo a vapor	EFGT	
Energia Produzida	106434	108011	86724	MWh
Energia Consumida na UC	432	432	432	MWh
Energia Comercializada	106002	107579	86292	MWh

Normalmente, em análises preliminares de viabilidade, pode-se prever os custos de uma central, com certa margem de erro, observando os custos de centrais já construídas, sendo que a tecnologia e as condições locais devem ser semelhantes. Custos de referência podem ser encontrados em diversas publicações para as tecnologias em questão (Bitola, 2016; Camporeale et al., 2015; Pantaleo et al., 2015; Quoilin et al., 2013; Teixeira et al., 2013; Arvay et al., 2011; Carrara, 2011; Gard, 2008). Entretanto, apenas o dimensionamento completo da planta, juntamente com o levantamento de custos dos equipamentos, obras e instalação, poderá dizer com precisão os custos reais dos empreendimentos.

Os dados sobre o custo de investimento foram atualizados para o ano de 2016 por fatores adimensionais indexados do CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*) (Chemical Engineering, 2016), de acordo com a Eq. 4.32:

$$Cu_A = Cu_B \frac{CEPCI_A}{CEPCI_B} \quad (4.32)$$

em que,

Cu_A = Custo no ano A

Cu_B = custo de referência no ano B

$CEPCI_A$ = fator indexado do CEPCI no ano A

$CEPCI_B$ = fator indexado do CEPCI no ano B

É amplamente observado nos cálculos econômicos que o custo de um equipamento não é diretamente proporcional à sua capacidade. Fatores econômicos de escala podem ser utilizados por esse motivo, especificamente para os custos dos equipamentos, considerando as condições típicas do mercado. Para isso, pode-se empregar a relação paramétrica, descrita na Eq. 4.33 (Boehm, 1987):

$$C_u = C_{u_0} \left(\frac{C_a}{C_{a_0}} \right)^a \quad (4.33)$$

O parâmetro C_a é a capacidade do equipamento. A Eq. 4.33 torna possível calcular o preço a partir de valores de referência (C_{a_0} e C_{u_0}) e o fator de escala "a", que podem ser encontrados para diversos equipamentos, por exemplo, em El-Halwagi (2012). Neste estudo foi utilizado um fator de escala médio de 0,7 para as tecnologias avaliadas neste estudo, de acordo com Kumar et al., 2003 e Dahlgren et al., 2013.

Finalmente, a Tabela 4.30 resume os custos referência atualizados e os custos totais de cada tecnologia em escala (de acordo com a Eq. 4.32), nos quais estão inclusos os custos dos equipamentos, os custos com a parte civil e engenharia, estimados em 73% dos custo dos equipamentos, e os custos indiretos (terra, licenças e pré-projeto), estimado em 12% dos equipamentos. Valores de acordo com Kreith e Boehm (1999) e Teixeira et al., 2013. Em relação ao custo do ciclo Rankine a vapor foi considerado um adicional de 10% em relação aos custos de referência dos equipamentos devido à utilização do condensador a ar (Maulbetsch e DiFilippo, 2006).

Tabela 4.30. Custos utilizados na análise econômica

	Custo	Custo de referência		Custo	Custo	Potência
	US\$/kW	Potência	Fonte	Atualizado*	Escalado*	kWe
	US\$/kW	kWe		US\$/kW	US\$/kW	kWe
Ciclo R. a Vapor	3611	5000	Bohlmann, 2011	3433	2791	13700
EFGT	5756	1383	Camporeale et. al., 2015	5592	3002	11000
ORC	5073	1000	Wright et. al., 2014	4903	2246	13500

* Custo Atualizado para 2016, de acordo com a Eq. 4.22 / ** Custos de referência escalados de acordo co a Eq. 4.23.

Além dos valores relativos à planta de potência (Tabela 4.31), deve-se considerar a custo da tubulação para condução dos gases da carbonização, onde se estima um valor de R\$ 2.300.000,00 para conectar os 120 fornos retangulares da Plantar, considerando os valores gastos atualmente pela empresa. O sistema é composto de dutos subterrâneos de alvenaria localizados nas duas chaminés de cada forno, onde dutos de menor diâmetro são conectados a um duto de central com diâmetro maior com leve inclinação para que os gases possivelmente condensados no interior do duto sejam escoados para o queimador.

Também, deve-se computar o custo relativo à conexão da planta à rede elétrica, a qual foi cotada em R\$ 1.136.300,00, considerando a ligação no ponto mais próximo da UC, a 7,7 km, na média tensão (13,8 kVA).

A taxa de cambio utilizada é de 3,25 US\$/R\$ e a taxa de juros é de 14,25% a.a. Os custos de manutenção e operação são estimados em 3% em relação ao custo total da planta (Dahlgren et al., 2013; Bejan e Tsatsaronis, 1995). Foi empregado um custo de importação em relação ao custo dos equipamentos, considerando a incidência de impostos e custos aduaneiros, valores de acordo com Pinzón et al, 2015, isto apara as tecnologias ORC e EFGT, não fabricadas no país.

Para calcular os indicadores econômicos utilizados nesta análise financeira, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), é preparado um fluxo de caixa, o qual apresenta o demonstrativo da receita líquida anual do projeto ao longo de sua vida útil, 25 anos (Camporeale et al., 2015, Wright et al., 2014; Arvay et al., 2011). O fluxo de caixa contempla todas as entradas e saídas de capital a cada ano, incluindo as receitas diretas e indiretas, os custos de investimento, custos operacionais e as deduções dos impostos. Considera-se que 70% do capital é financiado a uma taxa de juros de 14,25% a.a. com amortização em 15 anos no SAC (Sistema de Amortização Constante).

Para determinar a taxa de depreciação dos equipamentos utilizou-se das informações contidas na Instrução Normativa SRF nº 162, de 31/12/1998, que estabelece o prazo de 10 anos de vida útil e uma taxa anual de depreciação equivalente a 10% para caldeiras, instrumentos mecânicos, turbina a vapor, gerador e outros.

A composição de impostos sobre as receitas da venda de eletricidade para termoeletricas geralmente é a seguinte:

IR+CSSL: 34% sobre o Lucro Tributável

PIS/PASEP+COFINS: 3,65% da receita

Além das receitas diretas com a venda de energia, a usina evitará o consumo de 432 MWh de eletricidade, economizando R\$ 167.469,38 anualmente, levando em conta os custos atuais da Plantar.

Considera-se um preço de venda de eletricidade de R\$ 251/MWh, considerando o valor de venda de eletricidade das usinas no último leilão de energia para a biomassa (A5-2016),

entretanto, preços melhores podem ser obtidos fora dos leilões do ambiente de contratação regulada, caso sejam negociados no mercado livre de energia, em contratos bilaterais (CCEE, 2016).

O preço da eletricidade no mercado livre de energia elétrica é baseado principalmente sobre Preço de Liquidação de Diferenças, o PLD. Ele é utilizado para valorar mensalmente os saldos de energia de cada agente do mercado. Caso o saldo do agente seja negativo ele deve adquirir a energia consumida a mais pelo PLD. Do contrário, o agente vende esta energia, também pelo PLD. Este valor é fixado semanalmente pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) com base em diversos fatores como volume dos reservatórios e expansão da demanda. Ele é caracterizado por elevada imprevisibilidade, o que aumenta os riscos dos agentes do setor, porém, esses preços são limitados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) por um preço mínimo e um preço máximo, em 2016, na seguinte faixa: $R\$ 30,25/MWh \geq PLD \leq R\$ 422,56/MWh$ (ANEEL, 2016b).

No APÊNDICE III apresenta-se o fluxo de caixa do empreendimento para cada tecnologia avaliada. Os resultados dos indicadores econômicos calculados pelo fluxo de caixa são mostrados na Tabela 4.31 para três cenários distintos. O Cenário I contempla os custos estabelecidos nesta avaliação, o Cenário II considera que os custos totais sejam 30% menores que o atual e o Cenário III considera custos totais 30% maiores. A Figura 4.33 mostra a análise de sensibilidade econômica do projeto, onde os custos totais e o preço da eletricidade foram alterados a uma taxa +/- 30%.

Tabela 4.31. Resultados da Avaliação Econômica.

	Cenário II Custos -30%		Cenário I Custos de Referência		Cenário III Custos +30%	
	VPL	TIR	VPL	TIR	VPL	TIR
ORC	R\$ 26.339.364	28,7%	-R\$ 8.412.539	11,5%	-R\$ 37.372.457	5,0%
EFGT	R\$ 1.810.007	15,1%	-R\$ 35.937.956	3,9%	-R\$ 67.394.593	-1,1%
Ciclo R. Vapor	R\$ 15.819.209	21,4%	-R\$ 24.581.731	7,5%	-R\$ 58.249.181	1,9%

Na Tabela 4.32, para o Cenário I, todas as tecnologias apresentaram retornos positivos ($TIR > 0$), entretanto, em razão da alta taxa de juros atual do mercado atual (14,25%), os projetos não se mostram atrativos economicamente, apresentando resultados negativos de VPL. Este resultado negativo se inverte apenas no Cenário II, onde os custos são 30% inferiores aos de referência.

A tecnologia que apresentou o melhor retorno foi o ORC, com TIR de 11,5%, seguido do ciclo Rankine a vapor com, com 7,5 %, e da EFGT, com 3,9%. Para o ORC atingir o equilíbrio financeiro (VPL igual a zero) a eletricidade deve ser comercializada no mínimo a R\$ 272,50 R\$/MWh, abaixo deste valor o empreendimento passará a ter resultados negativos de VPL. Nos casos da EFGT e do ciclo Rankine a vapor, a eletricidade deve ser comercializada a R\$ 363,78/MWh e a 312,90 R\$/MWh, respectivamente, para que se atinja o equilíbrio financeiro.

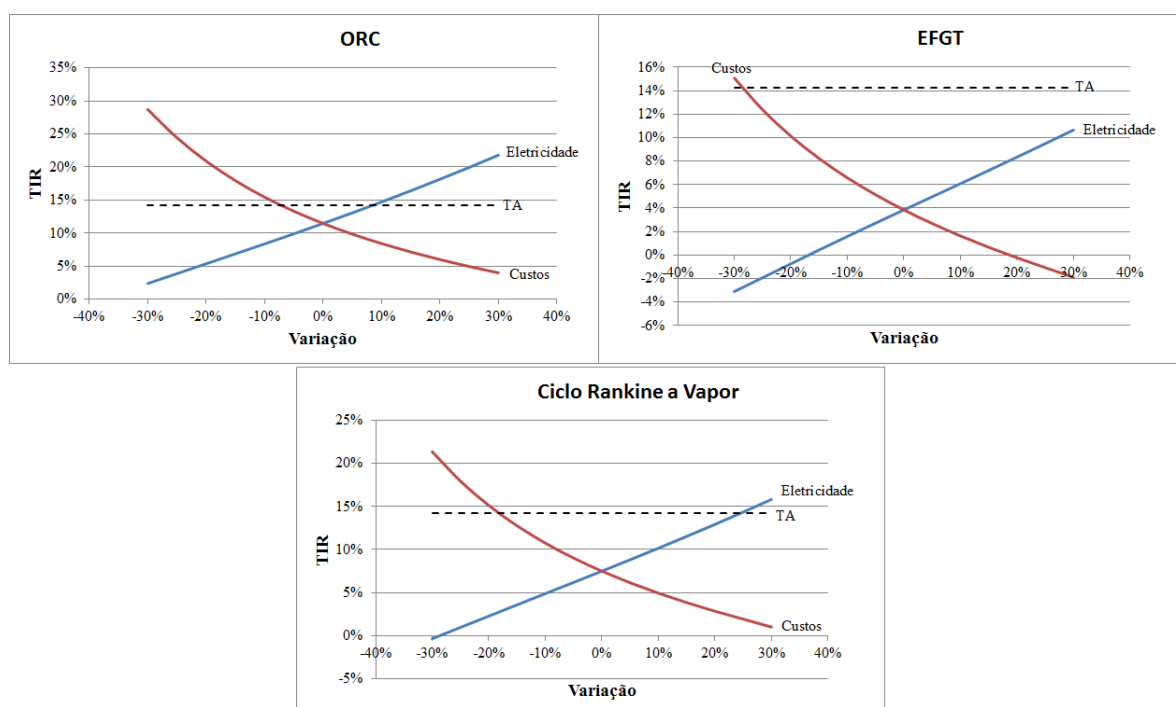


Figura 4.33. Resultado da análise de sensibilidade (TA = Taxa Mínima de Atratividade).

A análise de sensibilidade (Figura 4.33) tem como objetivo determinar a confiança sobre o modelo econômico, estudando as incertezas associadas a seus resultados, e determinando como as variações nos parâmetros de entrada do estudo influem nos indicadores econômicos. O eixo das abscissas, na Figura 4.33, mostra a variação em pontos percentuais do preço da eletricidade e dos custos totais dos empreendimentos em relação aos valores base, já o eixo das ordenadas mostra o resultado da TIR do investimento. Observa-se que todas as curvas se interceptam no mesmo ponto, o qual é o valor determinístico, quando todas as variáveis são substituídas por seu valor base. A linha pontilhada mostra a TA do investimento, considerada igual à taxa de juros do mercado, 14,25%. Quando as curvas assumem valores maiores que a TA o empreendimento passa a mostrar um VPL positivo, tornando-se, portanto, um

investimento atrativo. Para que isto ocorra para os casos da EFGT e do ciclo Rankine a Vapor, a redução de custos deve ser, respectivamente, 29% e 18%. Para o caso do ORC os custos devem ser 7% menores.

Considerando os resultados deste item, avalia-se como melhor opção tecnológica o ORC, por apresentar o melhor resultado econômico e por atingir uma boa eficiência, comparável ao do ciclo Rankine a vapor, na condições analisadas.

CAPÍTULO 5. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL E UTILIZAÇÃO DOS GASES NA UC

5.1. Metodologia de ACV no trabalho.

5.2. Inventário do Ciclo de Vida.

5.3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.

Neste capítulo, a queima dos gases de carbonização e a geração de eletricidade serão avaliadas sob o ponto de vista ambiental, por meio de uma ACV, elaborada com base nas normas ISO 14040 (ISO, 2006a), conforme discutido na seção 2.4. Primeiro, será abordada a maneira que a metodologia é aplicada no estudo e as principais considerações e limitações envolvidas. O próximo passo consiste na elaboração do ICV, a base de dados ambientais do estudo. Finalmente, será realizada uma AICV comparativa, entre os seguintes cenários:

Cenário 1: Produção de carvão vegetal do eucalipto sem queima de gases (Cenário Base)

Cenário 2: Produção de carvão vegetal com queima dos gases

Cenário 3: Produção de carvão vegetal com queima de gases e geração de eletricidade

5.1. Metodologia de ACV no trabalho

5.1.1 Definição do Objetivo e do Escopo

O objetivo da ACV neste trabalho é avaliar a mudança nos aspectos ambientais decorrentes da queima dos gases da carbonização e da geração de eletricidade dentro do sistema produtivo do carvão vegetal produzido em fornos retangulares, através de uma análise comparativa.

A aplicação almejada desta ACV é que seus resultados possam:

- Propor mudanças no sistema produtivo do carvão vegetal produzido por fornos retangulares com base em ganhos ambientais significativos.

- Subsidiar futuros estudos de ACV em setores produtivos que utilizam a madeira de eucalipto e o carvão vegetal, através da elaboração dos ICVs destes insumos, assim como possíveis abordagens que visem formas de tratamento ou outras formas de uso econômico ou não dos gases de carbonização.

O estudo será comunicado a comunidade acadêmica e as empresas do setor, através deste documento e pela elaboração de artigos científicos em jornais e revistas relacionados ao tema.

5.1.2. Função e unidade funcional.

A função do sistema considerado é a de produzir carvão vegetal com uso da biomassa produzida em florestas plantadas de eucalipto. Considera-se que o carvão em questão não é um produto final e sim intermediário, portanto, este estudo apresenta um ponto de vista de ACV *cradle to gate*, com foco em sua produção e não no uso final. A unidade funcional e o fluxo de referência do estudo compreendem uma tonelada de carvão vegetal, deste modo, todos os fluxos de entradas e saídas e os resultados do ICV são calculados com base neste valor.

5.1.3. Limites do Sistema.

A Figura 5.1 mostra os limites do sistema, considerando os subsistemas de produção florestal e UC, onde a madeira é transformada em carvão vegetal.

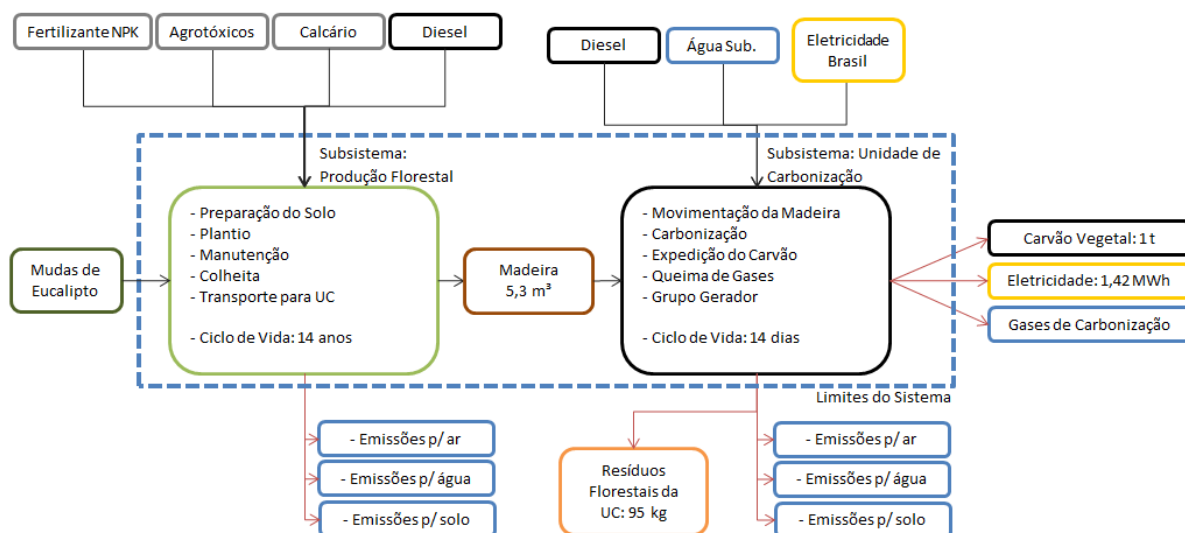


Figura 5.1. Limites do Sistema da ACV.

O subsistema produção florestal compreende as etapas de preparação do solo, plantio, manutenção da floresta, corte das árvores e transporte para a UC. O ciclo de vida da floresta varia de 7 a 21 anos, tempo entre o plantio, primeira colheita das árvores aos 7 anos, condução das rebrotas e uma ou no máximo duas novas colheitas, sendo, portanto, um ciclo de duas a três rotações, o que dependerá da produtividade apresentada por cada talhão⁴ na época da colheita. Normalmente, é esperado um decréscimo de produtividade em torno de 10% para a segunda e 20% para a terceira colheita em relação ao primeiro corte. Este estudo irá considerar um ciclo médio de duas rotações para contabilizar os insumos consumidos no sistema, e também, quando apropriado, serão utilizados valores inventariados anuais médios da fazenda no ano de 2015, sendo este ano um valor representativo do ciclo de vida real da floresta como um todo.

A produção florestal consome, primeiramente, as mudas de eucalipto, que vem de fora do sistema, produzidas em viveiros de terceiros. Diesel é utilizado nas operações de preparação do solo, plantio, cortes e transporte. Calcário é utilizado na etapa de preparação do solo, com o objetivo de regular seu PH. Também são utilizados agrotóxicos nas operações de capina química (Glifosato) e de controle de pragas (Sulfuramida), que são realizadas durante todo o ciclo. A adubação do solo, que objetiva o provimento de nutrientes as plantas, principalmente o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K), em formulações de NPK, é realizada durante as etapas de preparação do solo e também na fase de manutenção da floresta.

O subsistema UC compreende as operações de movimentação da madeira, onde as toras são colocadas do pátio para dentro dos fornos de carbonização, carbonização e a expedição do carvão, que diz respeito à retirada do carvão do forno e sua preparação para o transporte do produto. Durante a carbonização ocorre a emissão dos gases da carbonização, que podem ser emitidos diretamente para a atmosfera, queimados nos queimadores de gases ou utilizados para a geração de energia em um grupo gerador, de acordo com os cenários a serem avaliados). Este subsistema consome principalmente o diesel nas operações de movimentação e expedição, além de eletricidade gasta nos escritórios e na iluminação da UC.

⁴ Unidade mínima de cultivo uniforme de uma propriedade, construído com base em relevo e planejamento de plantio.

No mesmo subsistema ocorre a geração de resíduos florestais, que consistem basicamente de cascas e galhos remanescentes que se desprendem das toras de eucalipto durante a operação de movimentação da madeira, os quais são retirados da UC e utilizados como adubo orgânico nas áreas da fazenda, para melhoria das condições do solo local.

Outra saída do sistema é a energia elétrica, produzida a partir dos gases de carbonização. Quando a energia dos gases é recuperada para a geração de eletricidade e enviada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) considera-se que o consumo de recursos naturais e a emissão de poluentes pela produção de uma nova quantidade de energia no SIN são evitados, ou seja, impedindo os aspectos ambientais que seriam causados pela operação e construção de uma hidroelétrica ou de uma termoeletrica a gás natural, por exemplo. Deste modo, diferente das outras entradas e emissões, a energia é considerada como uma entrada negativa de aspectos ambientais na ACV.

Entretanto, deve-se considerar que, apesar da queima dos gases de carbonização reduzir os compostos em CO₂ e água, ela gera novos tipos de poluentes como, por exemplo, os óxidos de nitrogênio, que serão abordados mais adiante na elaboração do ICV.

5.1.4. Fronteiras Geográfica, Temporal e Tecnológica.

Os dados coletados para a realização desta ACV foram obtidos na Fazenda e na UC da Plantar Siderúrgica localizada em Itacambira, MG, entre anos de 2010 a 2015, durante visitas técnicas ao local.

A fazenda está localizada nas coordenadas: 43° 18' 32" W 17° 03' 53" S, em uma região de transição entre o Cerrado e a Caatinga. Possui uma altitude média de 1100 m acima do nível do mar, precipitação média anual de 917 mm, e temperatura de 24,5 °C.

A alteração do uso do solo iniciou em 1975, e hoje existem cerca de 20.488 hectares de florestas plantadas de eucalipto. No total, a fazenda conta com 36.092 ha, sendo que 38% constituem áreas de proteção ambiental, compondo as Áreas de Preservação Permanente (APPs), corredores de fauna e reserva legal.

O plantio de eucalipto é realizado com espaçamento de 9 m² (3 x 3 m), gerando uma madeira com densidade média básica de 0,48 g/cm³, com uso de clones híbridos de eucalipto “urograndis”. Em média, a fazenda produz 705.000 m³ de eucalipto por ano. Entretanto, este valor pode variar de acordo com a produtividade da fazenda, sujeita as variações climáticas, principalmente ao regime de chuvas. A produtividade de carvão é de 564.000 MDC anuais.

De maneira geral, as etapas do plantio e carbonização na fazenda seguem as seguintes práticas:

Preparação do Solo: inicia-se com a gradagem, realizada somente nas linhas de plantio, seguida da aplicação de calcário com o uso de trator de pneu, com esparramadora, onde é aplicada uma dosagem média de 1,3 t/ha. O próximo passo é a subsolagem e a adubação fosfatada com KCL + 1 % Boro realizada na linha de plantio, com uma proporção média de 500 kg/ha de Superfosfato Simples (SSP) e 200 kg/ha de KCL + 1% Boro, com o auxílio de trator de pneu com subsolador e adubadora.

Plantio: mudas são adquiridas em viveiros florestais de terceiros. É realizada uma adubação manual de NPK 06-30-06 na dosagem média de 111 kg/ha. Em 10 a 20 dias ocorre a etapa de replantio, conforme o índice de falhas, sendo que neste trabalho considerou-se um índice médio de 2 %, de acordo com os dados da fazenda. Após 60 dias é realizada a capina manual na linha para evitar a competição com outras plantas. As quantidades de pesticidas consumidos na manutenção da floresta variam de 0,5 a 4,0 kg/ha para o formicida sulfluramida e de 1,7 a 7,0 l/ha para o herbicida glifosato. A aplicação de isca formicida, com o princípio ativo sulfluramida, é feita em bombatas com 2 a 4 kg de produto, aplicada próximo aos formigueiros.

Manutenção da Floresta: Durante o período de desenvolvimento da floresta é importante que ocorra o combate às formigas e a capina, até que as árvores atinjam tamanho satisfatório para reprimir a vegetação invasora e resistir ao ataque dos insetos.

Corte: o primeiro corte da floresta ocorre quando a floresta atinge 7 anos, através de processo mecanizado. O corte é feito com o Feller-buncher, constituído basicamente por um trator de pneus ou de esteiras com um implemento frontal, que faz o corte, acumula árvores cortadas (formação de feixe) e as deposita no chão. Com a planta derrubada inicia-se o processo de desgalhamento, seguido do baldeio da madeira até as proximidades do carreador, realizado com o uso de Skidder, uma máquina equipada com garra hidráulica, capaz de segurar várias toras e arrastá-las até o carreador do talhão, onde são traçadas com a garra traçadora e empilhadas para secagem natural durante 180 dias. A Figura 5.2 mostra o maquinário utilizado nesta etapa.

Transporte para a UC: nesta etapa a madeira armazenada na beira do talhão é levada para a UC com uso de caminhões, carregados com o auxílio de trator com garra hidráulica.

Movimentação da madeira na UC: a madeira é retirada dos caminhões, levada aos pátios e depois carregada nos fornos, com o auxílio de tratores.



Figura 5.2. Maquinários utilizados na operação de corte da madeira

Carbonização e Resfriamento: inicia com a pirólise da madeira nos fornos retangulares. Na etapa de resfriamento é realizada a barrela nos fornos, onde água com argila é lançada na superfície externa dos fornos para acelerar o processo, realizado com um equipamento denominado “Barrelador”, que consiste em um reservatório contendo a mistura de água com argila, colocado sobre a carroceria de um caminhão conectado a uma bomba hidráulica e mangueira.

Expedição do carvão: etapa final de produção do carvão, onde ocorre o descarregamento do forno. Realizada por pá carregadeira e dois auxiliares que, após a abertura da porta, observam a existência de focos de fogo, que são extintos com jato de água ou com o fechamento da porta, se necessário.

Estima-se uma validade dos dados de 5 anos, considerando que não se esperam grandes mudanças nos tratos no curto prazo. A principal mudança que pode ocorrer na UC neste intervalo é a introdução efetiva da queima de gases e da geração de energia, possibilidades que já serão abordadas neste estudo.

5.1.5. Metodologia de Avaliação dos Impactos ambientais.

Este trabalho usa como metodologia de AICV o CML-IA Baseline v.3.01 (CMLCA, 2016). O CML foi desenvolvido na Universidade de Leiden (Holanda) pelo *Centre for Environmental Science of Leiden University*, e é baseado em indicadores referenciais, portanto, as saídas do ICV são convertidas em resultados na AICV a partir de fatores de caracterização (Guinée et al., 2002). Os fatores de caracterização e normalização do CML podem ser encontrados em CMLCA (2016).

De acordo com a USEPA (2006), as AICVs focam nos impactos potenciais em três principais categorias: saúde humana, ecológica e uso de recursos abióticos. A seleção das categorias de impacto levou em conta esses fatores, em conjunto com as emissões reportadas no ICV, apresentado adiante, visando atingir o objetivo e o escopo do estudo.

As categorias selecionadas estão listadas no CML e, de acordo com Guinée et al., (2002) e Boer (2007), são recomendadas para uso em qualquer AICV (Boer, 2007). São elas:

Depleção de Recursos Abióticos: categoria relacionada com a extração de minerais e combustíveis fósseis escassos do planeta, portanto, não renováveis. As reservas de um recurso do tipo, quando exauridas pelo homem, podem, em longo prazo, impedir ou limitar seu uso como recurso às futuras gerações, causar pressão sobre os recursos que o substituem, e dificultar atividades que dependem deste recurso. O fator de caracterização para depleção abiótica é determinado em kg Sb eq (kg de antimônio equivalente/kg de recurso extraído), baseado na concentração das reservas e na taxa de uso do recurso (Guinée et al., 2002; Ferreira, 2004).

Mudança Climática Global: referente ao aumento da temperatura terrestre causada pelo acréscimo na concentração de GEE, capazes de refletir as radiações de ondas longas emitidas pela superfície da Terra, aquecendo acima do normal a baixa atmosfera. O fator de caracterização, desenvolvido pelo IPCC, é definido em relação ao potencial de aquecimento de um kg de CO₂ em GWP₁₀₀, expresso em quilogramas de CO₂ equivalente por quilogramas de emissão (kg CO₂ eq/kg emissão), o número 100 diz respeito a um tempo de vida de 100 anos (GWP₁₀₀) da substância na atmosfera, o escopo geográfico é global (Goedkoop, et al. 2008).

Depleção da camada de Ozônio: a diminuição da concentração de ozônio na estratosfera leva a queda da absorção da radiação ultravioleta, aumentando sua incidência sobre os sistemas biológicos a ela sensíveis (Kiperstok et al., 2002). O modelo de caracterização foi desenvolvido pelo *World Meteorological Organization* – WMO, que define o potencial de destruição da camada de ozônio para diferentes gases em relação ao Triclorofluormetano em kg de CFC-11 equivalentes. O escopo geográfico do indicador é global (Goedkoop et al. 2008).

Toxicidade Humana: causada por atividades que emitem substâncias tóxicas combinadas com rotas de exposição aéreas ou então por meio de ingestão de alimentos. Pode afetar os seres humanos em escala local, regional e global. Os fatores de caracterização são calculados para cada substância e são expressos em 1,4-diclorobenzeno equivalentes/kg de emissão (Wenzel et al., 1997; Goedkoop et al., 2008).

Oxidação fotoquímica: formação de substâncias reativas (principalmente o ozônio) na troposfera as quais são prejudiciais à saúde humana e ecossistemas, podendo, inclusive, prejudicar cultivos. Esta categoria também é conhecida como “*summer smog*” ou “*smog* fotoquímico”, termo que resulta das palavras da língua inglesa “*smoke*” (fumaça) e “*fog*” (nevoeiro), usado para descrever os nevoeiros roxo acinzentados, carregados de poluentes de carros e fumos industriais, observados nas grandes cidades. Hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio na presença da luz solar, principalmente em dias quentes e secos, reagem para formar ozônio de baixa altitude e outros compostos através de reações fotoquímicas. A categoria usa como indicador o potencial de criação de ozônio fotoquímico, modelo desenvolvido pela UNECE⁵, expresso em kg de etileno (C₂H₄) equivalentes (Guinée et al., 2002).

Acidificação: Emissões atmosféricas de certos compostos como óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, podem levar à formação de ácidos na atmosfera, que, conseqüentemente, causam aumento na acidez das precipitações (Kiperstok et al., 2002). A caracterização é medida pela capacidade da substância em formar íons H⁺, definindo-se o

⁵ *United Nations Economic Commission For Europe*

potencial de acidificação pela quantidade de íons H^+ produzidos por kg de substância em relação ao SO_2 .

Eutrofização: abrange todos os aspectos relacionados a níveis altos de macronutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo lançados em ambientes terrestres ou aquáticos. O excesso de macronutrientes pode causar, por exemplo, o acelerado crescimento de algas e afetar o equilíbrio ecológico em ecossistemas aquáticos (Bauer, 2003). Potências de eutrofização são expressos em PO_4^{-3} equivalentes.

5.1.6. Requisito de Dados.

Para elaboração do ICV é fundamental à obtenção de dados representativos a respeito daquilo que se pretende estudar. Preferencialmente, as informações inventariadas devem ser obtidas por fontes primárias, ou seja, com as empresas relacionadas ao sistema de produto a ser avaliado ou por medições diretas.

Neste trabalho, dados sobre a quantidade de insumos consumidos e emissões, dentro dos limites do sistema (Figura 5.1), foram obtidos com a Plantar Siderúrgica. Já nos ICVs relacionados aos insumos consumidos pelo sistema, foram utilizados dados secundários, pois as respectivas fontes primárias se encontravam indisponíveis. Tais informações foram obtidas através de consultas literárias.

Os dados têm primários tem origem dos registros de consumo da fazenda, cálculos baseados em especificações técnicas dos insumos e conversão direta de dados. Deste modo, os dados inventariados representam os valores médios do processo produtivo, de acordo com a tecnologia descrita neste trabalho. Para a coleta de dados e os cálculos foram consideradas as condições usuais de trabalho. Em relação à fonte de dados dos ICVs secundários apresenta-se a Tabela 5.1.

Estudos como Silva (2012), Sugawara (2012), Ribeiro (2009), Monteiro (2008) e Viana (2008) são fontes brasileiras de ICVs, e que, portanto, avaliaram a cadeia produtiva nacional dos respectivos produtos. Para o cloreto de potássio e o glifosato foram utilizados inventários de fora do país, retirados da base de dados do Simapro, que representam a realidade europeia. Hoje a base de dados Ecoinvent v3 (2013) já conta com alguns ICV de produtos brasileiros, entres eles a eletricidade, usada neste trabalho, que considera a composição aproximada da

produção elétrica nacional com as fontes: hidroelétrica (81%), biocombustíveis (6%), gás natural (5%), óleo combustível (3%), carvão (2%) e eólica (1%).

Tabela 5.1. Fontes de dados secundárias para a elaboração do ICV

Produto	Unidade	Fonte
Sulfato de Amônio	kg	Ribeiro (2009)
Superfosfato Simples	kg	Monteiro (2008)
Cloreto de Potássio	kg	Althaus et al. (2007)
Glifosato	kg	Althaus et al. (2007)
Sulfluramida		não aplicado
Calcário (CaCO ₃)	kg	Viana (2008)
Produção do Diesel	kg	Sugawara (2012)
Produção de Mudanças	kg	Silva (2012)
Eleticidade	MWh	Ecoinvent (2013)
Uso do Diesel	kg	Nemecek e Käji (2007)

O ICV da sulfluramida não foi encontrado em bases nacionais ou internacionais, entretanto, o uso deste composto representa menos de 1% do fluxo de massa do sistema e, assim, pode ser colocado como pouco relevante. Considera-se isto, entretanto, como uma limitação deste estudo. Trabalhos que avaliaram a produção de eucalipto no Brasil, como Galdiano (2006) e Silva (2012), também não consideraram a cadeia produtiva de sulfluramida como carga a montante do sistema.

Em um ICV Florestal ainda deve ser considerado o uso da terra e sua transformação para uso agricultável e a absorção de gás carbônico da atmosfera e sua consequente fixação na biomassa vegetal das árvores. Neste caso utilizam-se os dados da fazenda em conjunto com a metodologia recomendada por IPCC (2003).

5.1.7. Limitações

Primeiramente, é importante salientar que este é um estudo de ACV do tipo *cradle to gate*, deste modo, as etapas de uso e disposição final do produto não estão incluídas.

Este estudo compreende a análise de apenas um exemplo de sistema, onde ocorre a produção de carvão vegetal com o uso de eucalipto plantado. Portanto, os dados aqui apresentados têm

boa representatividade apenas para esta localidade. Ressalta-se, entretanto, que existe semelhança entre as práticas das grandes empresas do setor, porém, a qualidade na extrapolação dos dados só pode ser avaliada através de um estudo estatístico de sensibilidade, com a inclusão de mais empresas produtoras de carvão vegetal.

Outra limitação do estudo está relacionada ao uso de inventários estrangeiros para a cadeia produtiva do cloreto de potássio e do glifosato, assim como a exclusão da cadeia produtiva da sulfluramida. Também, no sistema, existem diferentes tipos de entradas e saídas desconhecidas ou não quantificadas e, então, não incluídas, como o consumo de mangueiras, óleos lubrificantes, bens pessoais, material de escritório e alimentação de funcionários. Comumente, consideram-se como irrelevantes os impactos gerados pelo consumo destes bens. Por simplificação, máquinas, equipamentos, edifícios e demais bens de capital não foram incluídos no estudo. Geralmente, dentro do longo ciclo de vida de uma floresta de eucalipto e da UC, os impactos ocasionados pela produção destes bens tornam-se pouco relevantes. Como regra geral nos estudos de ACV, esses produtos causam um décimo dos impactos quando comparados ao ciclo de vida total (Finnveden, 2005a; Finnveden, 2005b).

Os dados coletados acerca das emissões dos gases de carbonização foram obtidos em dezembro de 2010, com as toras de eucalipto disponíveis na época, ver APÊNDICE I, e nos fornos retangulares já descritos no trabalho (Capítulo 3). Sabe-se que a pirólise da madeira é sensível à tecnologia utilizada, condições do processo e às características do insumo, como umidade, além de condições ambientais, que pode modificar a composição dos gases emitidos.

Neste trabalho não foram medidas as emissões relativas à queima dos gases de carbonização em queimadores de gases de carbonização ou mesmo caldeiras para o caso da geração de eletricidade. Deste modo foram utilizados dados de emissões da literatura, reportados por Barcellos et al., (2004) e Cornelissen et al., (2016), que avaliaram a queima do gás de pirólise gerados pela carbonização da biomassa.

Outros aspectos relacionados às limitações deste estudo e a qualidade na extrapolação dos dados são listados abaixo:

- A produção florestal pode variar de acordo com a espécie madeireira utilizada, o clima e a qualidade do solo, que irão influenciar diretamente no consumo de insumos como fertilizantes e calcário. Outro fator a considerar são as práticas agrícolas empregadas, como, por exemplo, o uso ou não de maquinário nas etapas de plantio e corte das árvores.

- Normalmente as UCs e suas florestas estão localizadas longe dos pontos consumidores, além disso, o tamanho da floresta e números de UCs que consomem a madeira produzida por ela pode variar de modo significativo. Fatores que podem modificar o transporte e consequentemente o consumo de combustíveis dentro do sistema florestal.
- A tecnologia nas UCs tem sofrido um grande avanço nos últimos 15 anos e perspectivas futuras indicam para mais mudanças. Entre essas mudanças destacam-se novos métodos de controle do processo (controle de entradas de ar e temperatura), novos tipos de fornos, queimadores de gases, aproveitamento dos gases condensáveis, e geração de energia elétrica.
- Em relação silvicultura do eucalipto, existe um constante desenvolvimento na área de melhoramento genético das espécies, que visam o aumento de produtividade, maior resistência a pragas e menor demanda de nutrientes.

5.2. Inventário do Ciclo de Vida

5.2.1. Subsistema Produção Florestal

Uma floresta de eucaliptos sequestra carbono da atmosfera, na forma de CO_2 , e o incorpora em sua biomassa, na forma de carbono, ou seja, na matéria orgânica que constitui suas raízes, tronco, cascas, folhas e galhos. Porém, a produtividade de uma fazenda normalmente é medida apenas em madeira aproveitável que deixa a floresta, portanto, exclui-se dos cálculos parte da biomassa realmente produzida. De acordo com a metodologia do IPCC (2003), para plantios de eucalipto em florestas secundárias tropicais, deve-se considerar um valor de expansão da biomassa de 20% para computar a parte da árvore que fica sobre o solo durante a colheita, ou seja, na forma de casca, galhos e folhas, e mais 20% para as raízes. Segundo os dados de Carneiro et al. (2012a) uma árvore de eucalipto contém em média 48% de carbono em base seca. Considerando os fatores acima e, com o fator de conversão de carbono para CO_2 , 44/12, estima-se a absorção de carbono em 1,259 tCO_2 por m^3 de madeira produzida.

Emissões para o meio hídrico e para atmosfera devido à aplicação dos fertilizantes nitrogenados no solo também foram considerados, em relação ao N_2O e NH_3 para a atmosfera e NO_3^- para a água. Fatores de emissão de 0,01 kg $\text{N}_2\text{O-N}$, 0,1 kg $\text{NH}_3\text{-N}$ e 0,3 kg $\text{NO}_3^- \text{-N}$ por kg de N aplicado foram utilizados, de acordo com IPCC (2006). Para os fertilizantes fosfatados foi estimada a emissão de fosfato para a água, a uma taxa de escoamento de 10% do total aplicado.

As emissões de glifosato para a água foram estimadas com base no estudo de Jabbar et al., (2008). O deslocamento dos resíduos agroquímicos ocorre no sentido horizontal, por erosão hídrica e, no sentido vertical, por lixiviação. As áreas de plantio na fazenda apresentam relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, com solos permeáveis e de baixa erodibilidade. Como o glifosato possui boa adsorção e decomposição no solo, infere-se que a lixiviação do composto para os lençóis é pequena (Banco Mundial, 2010). O ICV consolidado do subsistema florestal encontra-se no APÊNDICE IV.

5.2.1. Subsistema Unidade de Carbonização

No subsistema UC, encontra-se a saída do principal produto do sistema, o carvão vegetal. Além dele, ocorre a produção de resíduos florestais e de eletricidade. Para cada cenário analisado, mostrados no início do Capítulo 5, têm-se um diferente ICV, que irá variar de acordo com a taxa de queima de gases, produção de eletricidade, e, conseqüentemente, emissões.

Como discutido no item 4.1.1 no Capítulo 4, sobre o balanço de massa, existe uma quantidade não contabilizada de gases que saem do forno retangular, que, portanto, não foi considerada. Todavia, para os cenários com queima de gases foi estimado que 90% dos gases são realmente queimados, como meio de contabilizar possíveis perdas e ineficiências do sistema, portanto, ainda 10% dos gases serão emitidos na atmosfera sem passar pelo queimador. Da mesma forma este valor foi utilizado para estimar o potencial energético, como discutido no item 4.2 no Capítulo 4.

A combustão transforma os gases da carbonização em outras substâncias, principalmente CO₂ e H₂O, no entanto, a queima de qualquer combustível está associada à geração de poluentes, como, óxidos de nitrogênio, particulados, monóxido de carbono e compostos orgânicos. Estas emissões dependem do tipo de combustível, da tecnologia empregada na queima e da eficácia dos sistemas de controle de poluição que podem ou não estar presentes

Neste trabalho, não foram medidos diretamente os compostos gerados pela queima dos gases de carbonização. Deste modo, foram utilizadas as emissões de poluentes reportadas por Barcellos et al., (2004) e Cornelissen et al., (2016), os quais avaliaram as emissões da queima dos gases da pirólise lenta da biomassa. Segundo Gustafsson (2013), em comparação a queima direta da biomassa, a combustão dos gases da pirólise produz menores emissões de CO, NO_x e particulados. Também, problemas relacionados à sinterização e corrosão em

caldeiras são diminuídos, em razão da menor emissão de compostos alcalinos e cloro (Brownsort, 2009).

A formação de CO₂ e H₂O pode ser estimada pelo balanço da reação de combustão dos GC e GNC, considerando os gases gerados pela produção de 1 tonelada de carvão vegetal. Para isto, foi utilizada a composição média dos GNC e GC (Tabela 4.6), e a composição média do alcatrão vegetal reportada por Romeiro (2008). Os cálculos do balanço estequiométrico da combustão podem ser visualizados no APÊNDICE V. A Tabela 5.2, mostra as emissões de CO₂ e H₂O resultantes da combustão completa dos gases da carbonização, para cada componente do gás, já a Tabela 5.3 mostra a emissão de todos os componentes gerados na queima dos gases. Os cálculos consideram que 90% dos gases são queimados, conforme explicado anteriormente.

Tabela 5.2. Emissões de gás carbônico e água durante a queima dos gases de carbonização

	CO ₂	H ₂ O	
GNC	1957	284	kg/t carvão
GC	413	1621	kg/t carvão
Alcatrão	41	17	kg/t carvão

Tabela 5.3. Emissões de gases resultantes da queima dos gases da carbonização.

CO ₂ *	2411,4	kg/t carvão
H ₂ O*	1922,2	kg/t carvão
N ₂ *	6369,0	kg/t carvão
O ₂ *	957,0	kg/t carvão
COV**	0,082	kg/t carvão
NO _x **	0,45	kg/t carvão
Particulados***	9,9	kg/t carvão

* Calculado pelo autor / ** Calculo com base nos dados de emissão Barcellos et al., (2004)⁶ / Calculo com base nos fatores de emissão de Cornelissen et al., (2016).

⁶ Barcellos et al. (2004) reporta uma emissão de 40 a 55 ppm de NO_x e 20 a 30 ppm de COV. Os cálculos foram realizados considerando 3% de excesso padrão de O₂, a 15 °C e 1 atm, de acordo com a ISO 2533 (ISO, 1975). O NO_x é calculado como NO₂ e os COV como CH₄.

Na Tabela 5.2, a vazão de água já presente nos GC é de 1486 kg/t carvão, o restante é formado pelo processo de combustão. Segundo os cálculos do APÊNDICE V, a vazão de ar requerida para a queima estequiométrica dos gases (GNC+GC+Alcatrão) é de 4194 kg, já a vazão de ar nos GNC é de 8304, portanto, o suficiente para a queima, o que resulta em um coeficiente de excesso de O₂ (λ) de 1,98.

Na Tabela 5.3, o O₂ emitido é resultado do excesso de O₂ presente nos GNC, sendo a quantidade consumida durante a queima igual a 977 kg.

Para a geração de eletricidade, considerou-se a potência bruta disponível de 57125 kWt, como calculada no item 4.2, e o uso de um ORC, o qual apresenta uma potência instalada de 13,5 MWe, de acordo com a Tabela 4.29. Assim o sistema é capaz de produzir 106.634 MWh por ano (Tabela 4.30). Esta tecnologia foi selecionada por apresentar o melhor resultado econômico, conforme discutido no item 4.3.4.

De acordo com dados da UC, consome-se anualmente cerca de 432 MWh de eletricidade e 44.938 m³ de água subterrânea na barreira dos fornos. São produzidas anualmente 121.164 toneladas de carvão. Os ICVs consolidados dos cenários 1, 2 e 3 encontram-se no APÊNDICE IV.

Uma das principais funções de uma plantação bioenergética é sua sustentabilidade, o que pode ser traduzido em redução de emissões de carbono e na produção de energia renovável. Entretanto, a maioria dos sistemas silviculturais intensivos, para assegurar alta produtividade, requer o *input* de grande quantidade de energia, por exemplo, na preparação do solo, no plantio e no uso de fertilizantes, atividades que consomem energia fóssil e emitem carbono durante sua execução, manufatura, extração mineral, transporte e aplicação. Com os dados do ICV pode-se avaliar a sustentabilidade de um sistema bioenergético. Comumente, os valores mais utilizados são a relação entre a energia produzida e consumida anualmente (*output/input*), a produtividade de energia (energia produzida menos a energia consumida por hectare ou por quantidade de produto) e o coeficiente de emissão de carbono (GEE expressos em t de CO₂ equivalentes).

A Tabela 5.4 mostra a quantidade energia fóssil e renovável consumidas no ciclo de vida do carvão vegetal, de acordo com os resultados do ICV.

Tabela 5.4. Quantidade de energia consumida durante o ciclo de vida do carvão vegetal (para 1 t de produto).

	Insumos [kJ]	Diesel [kJ]	Elettricidade Consumida na UC [kJ]	Total [kJ]
Energia Fóssil Consumida	51471 10%	300528 59%	6031 1%	358030 70%
Energia Renovável Consumida	135926 27%	453 0%	16727 3%	153106 30%
Total	187397 37%	300982 59%	22758 4%	511136 100%

Nota-se na Tabela 5.4 que 70% da energia utilizada para produzir o carvão é de origem fóssil, com destaque para o consumo do Diesel usado nas operações florestais e na UC, responsável por 59% do total, seguido dos insumos (calcário, mudas, fertilizantes e herbicidas) com 10% e a da eletricidade consumida na UC com 1%.

A maior parte da energia referente aos insumos é de origem renovável (27% do total) que somada a fóssil (10% do total), faz com que os insumos representem 37% do *input* de energia. Já para o caso da eletricidade o valor é de apenas para 4% do total. A pequena parcela de energia renovável do diesel (453 kJ/t carvão) provêm de aportes de energia renovável no seu sistema produtivo (Sugawara, 2012).

A Tabela 5.5 mostra o resultado da relação *output* de energia renovável e o *input* de energia fóssil do ciclo de vida do carvão vegetal, para os casos com e sem a geração de eletricidade a partir dos gases de carbonização. A razão foi calculada pela Eq. 5.1.

$$\text{Output}_{\text{Renovável}} / \text{Input}_{\text{Fóssil}} = \left(\frac{(\text{Output}_{\text{Total}} - \text{Input}_{\text{Renovável}})}{\text{Input}_{\text{Fóssil}}} \right) / \text{ciclo} \quad (5.1)$$

O termo “ciclo” na Eq. 5.1 representa o tempo do ciclo de vida representativo da floresta, considerado como 14 anos para o caso deste estudo. Deste modo o resultado da relação fica representado como uma média anual do ciclo de vida do produto.

Tabela 5.5. Resultado da relação *input* de energia renovável e fóssil e o *output* de energia para os produtos gerados no ciclo de vida do carvão (valores para 1 t de produto produzida em um ciclo de vida de 14 anos).

Caso	Input de Energia [kJ]		Output de Energia [kJ]	Relação Output/Input [ano ⁻¹]
	Renovável	Fóssil		
1 - Carvão	153106	358030	29483000	5,9
2 - Carvão + eletricidade	153106	358030	33020155	6,6

Na Tabela 5.5, considerando apenas a produção de carvão (Caso 1), os resultados mostram que para cada unidade de energia fóssil consumida são produzidas 5,9 unidades de energia renovável na forma de produto por ano. Quando a energia dos gases da carbonização é usada para a produção de eletricidade (Caso 2), a relação *output/input* sobe para 6,6, recuperando-se 0,7 unidades de energia, o que representa um ganho de aproximadamente 12%. Os resultados da emissão de carbono, bem como de outros impactos ambientais serão apresentados e discutido na próxima seção.

5.3. Avaliação do Impacto do ciclo de Vida

Os resultados da caracterização por unidade funcional (1 tonelada de carvão vegetal), para cada categoria de impacto selecionada na ACV, serão apresentados separadamente a seguir.

5.3.1. Depleção de Recursos Abióticos

A Figura 5.3 apresenta os resultados da AICV para a categoria de impacto Depleção de Recursos Abióticos.

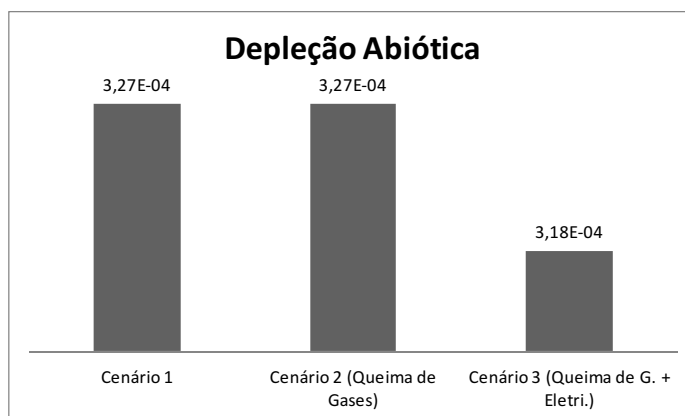


Figura 5.3. Resultados da AICV para depleção de recursos abióticos, em kg Sb eq./t_{carvão}.

Os principais insumos abióticos consumidos são o enxofre e o fósforo, ambos não renováveis, utilizados na produção de fertilizantes no subsistema florestal, os quais representam 91% do resultado da categoria. A produção de eletricidade no Cenário (3) contribuiu para compensar indiretamente o uso de recursos abióticos (-3%).

Um resultado negativo na AICV, como no caso da produção de eletricidade, é indicativo de impactos potenciais positivos ao ambiente. Isto ocorre porque o envio de eletricidade ao Sistema Interligado Nacional (SIN) evita o consumo de recursos para a geração de eletricidade, tais como: carvão, gás natural e petróleo; utilizados para produzir parte da eletricidade gerada no Brasil⁷. Isto pode ser melhor observado quando se avalia esta categoria apenas do ponto de vista do consumo de combustíveis fósseis, como mostra a Figura 5.4.

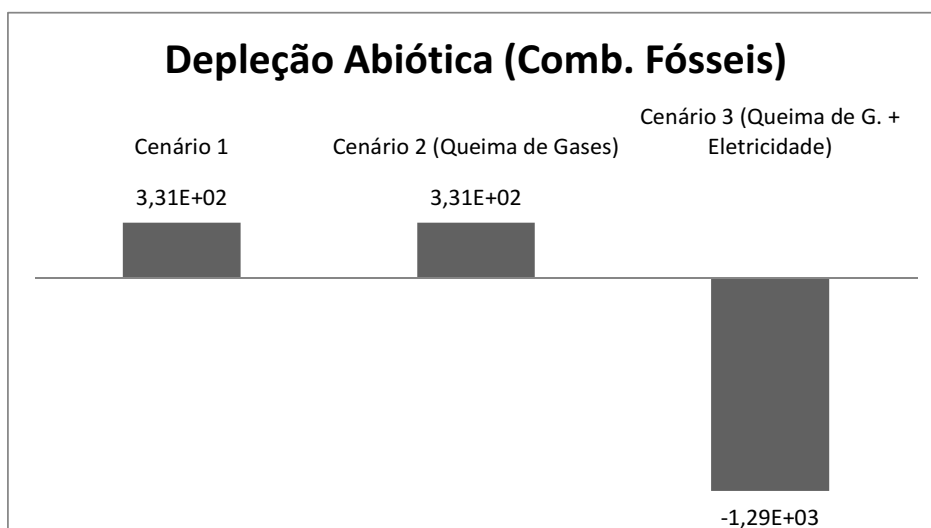


Figura 5.4. Resultados da AICV para depleção de recursos abióticos, combustíveis Fósseis, em MJ/t_{carvão}.

No Cenário (3), a soma dos impactos positivos (consumo de combustíveis fósseis) e negativos (geração de eletricidade) é negativa, mostrando que a geração de eletricidade é capaz de não só compensar o consumo de combustíveis fósseis do ciclo de vida do carvão vegetal, como

⁷ Salienta-se que os impactos relacionados às estruturas, como a conexão ao SIN, estão excluídos da análise, como discutido no item 5.1.7. O mesmo vale para os impactos relacionados à infraestrutura da energia deslocada no SIN

também economizar o uso destes recursos no sistema elétrico nacional, atingindo cerca de 1576 MJ por tonelada de carvão produzida, indicando que a eletricidade proveniente dos gases da carbonização pode contribuir para evitar o uso de recursos energéticos fósseis no país.

Os resultados desta categoria poderiam ser ainda melhores se fosse considerado nesta categoria que o carvão vegetal é um substituto direto do carvão mineral, um recurso abiótico não renovável.

No ciclo de vida do carvão, 97,9% do consumo de combustíveis fósseis vêm do subsistema florestal, o restante, 1,76% e 0,38% vem do consumo de eletricidade e Diesel na UC, respectivamente. Para o subsistema florestal apresenta-se a Figura 5.5, onde nota-se que o consumo de Diesel corresponde a 92,2% do resultado, seguido dos insumos somados consumidos para produzir o eucalipto que representam 7,8%, com destaque para a cadeia produtiva do sulfato de amônio com 6%.

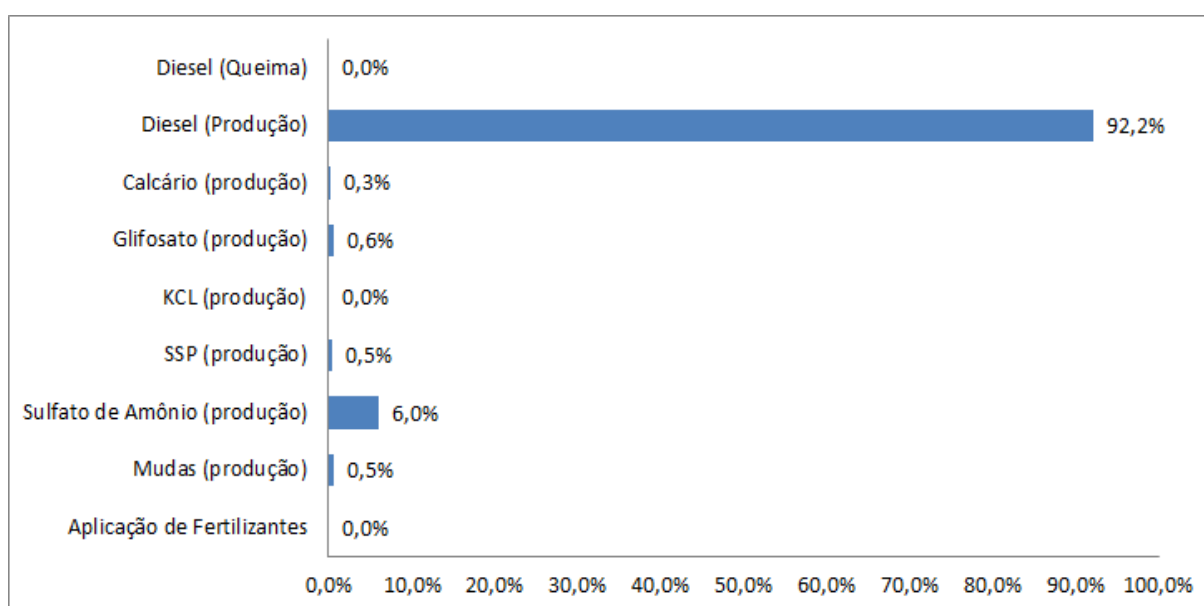


Figura 5.5. Produção de eucalipto, porcentagem contribuição por subsistema na categoria Depleção de Recursos Abióticos, combustíveis fósseis (Total: 324 MJ/5,31 m³_{madeira})

A metodologia do CML considera nestes cálculos apenas entradas e saídas de combustíveis fósseis computadas em massa no ICV, entretanto, os ICVs secundários utilizados neste estudo reportam também entradas diretas na forma de energia, que não são contabilizadas pela metodologia, por isso, os valores diferem dos resultados da Tabela 5.4 e 5.5, que considera os dois tipos de fluxo.

5.3.2. Aquecimento Global

No ciclo de vida do carvão vegetal, a maior parte das emissões de gases do efeito estufa estão relacionadas ao processo de carbonização (pirólise) na UC, responsável por 98,2% do resultado total, seguido do subsistema florestal com apenas 1,77%, como mostra a Figura 5.6 para o Cenário (1).

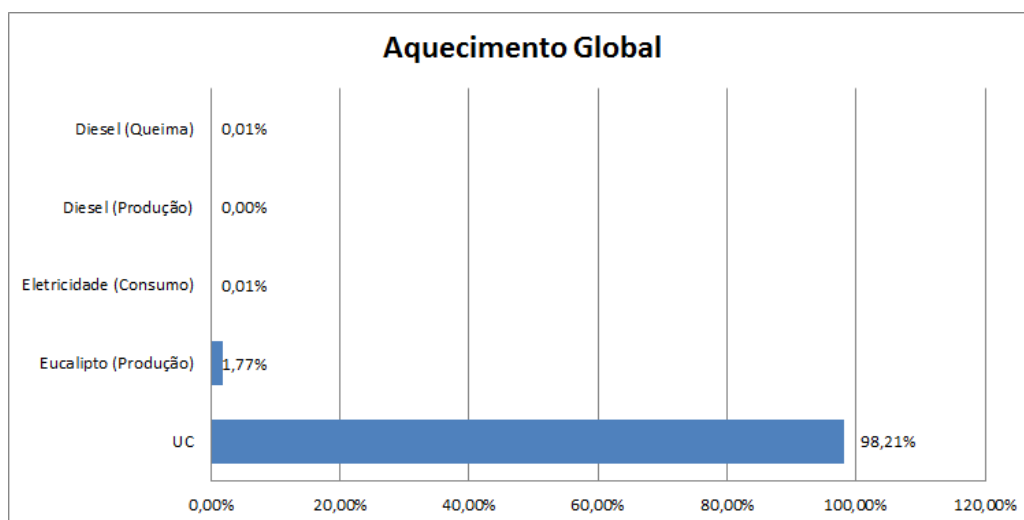


Figura 5.6. Produção de carvão vegetal (Cenário 1), porcentagem de contribuição por subsistema na categoria Aquecimento Global (Total do Cenário 1: 3227 kg CO₂ eq/t_{carvão}).

No ciclo de vida do carvão são emitidos 3280 kg CO₂ eq. por tonelada de carvão produzida, sendo que 1918 kg (58,5%) vêm da geração de metano resultante da pirólise do eucalipto, 1306 kg CO₂ eq. (39,8%) da geração de CO₂ biogênico, também gerado na pirólise, e 54 kg CO₂ eq. (1,6%) de carbono fóssil, gerado pelo consumo de diesel no maquinário agrícola (Utilizado na UC e na etapa florestal) e em menor parte pela eletricidade consumida na UC. Esta situação é ilustrada na Figuras 5.7 e os resultados em porcentagem para as principais substâncias emitidas pode ser observado na Tabela 5.6 para o subsistema UC e na Tabela 5.7 para o subsistema Florestal.

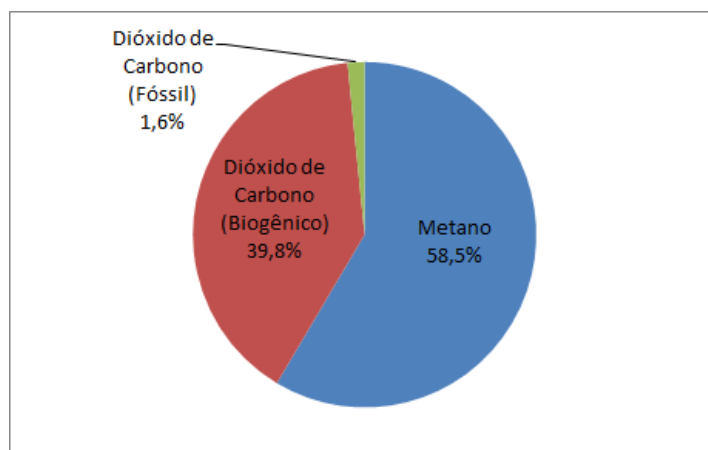


Figura 5.7. Emissões de GEE no processo produtivo do carvão vegetal, porcentagem de cada substância em relação ao total emitido no ciclo de vida do carvão: 3280 kg CO₂ eq./t_{carvão}.

Tabela 5.6. Porcentagem de contribuição no subsistema UC para as principais substâncias emitidas na categoria de impacto aquecimento global.

	Total	Carbonização	Produção de Eucalipto	Elettricidade UC	Diesel UC (produção)	Diesel UC (queima)
Metano	58,5%	58,5%	0,0%	0,00%	0,00%	0,00%
CO ₂ Bio	39,8%	39,7%	0,1%	0,00%	0,00%	0,00%
CO ₂ Fóssil	1,6%	0,0%	1,6%	0,01%	0,00%	0,01%
Total	100,0%	98,2%	1,7%	0,01%	0,00%	0,01%

Tabela 5.7. Porcentagem de contribuição no subsistema florestal (produção de eucalipto) para as principais substâncias emitidas na categoria de impacto aquecimento global.

	Total	Aplicação de Fertilizante	Mudas (produção)	Sulfato de Amônio (produção)	SSP (produção)	KCL (produção)	Glifosato (produção)	Calcário (produção)	Diesel (Produção)	Diesel (Queima)
CO ₂ Fóssil	91,6%	0,0%	0,0%	0,2%	0,2%	0,0%	0,3%	0,0%	5,1%	85,9%
CO ₂ Bio	4,9%	0,0%	0,0%	2,9%	0,2%	1,5%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
N ₂ O	1,8%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	1,0%
Metano	1,5%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	1,1%	0,1%
Total	99,8%	0,7%	0,0%	3,3%	0,4%	1,6%	0,3%	0,1%	6,4%	87,0%

A maior parte das emissões relativas ao ciclo de vida do eucalipto vem da queima do diesel no maquinário agrícola, com 87%, seguido de sua cadeia produtiva, com 6,4%, e da cadeia produtiva dos insumos restantes, com 5,7%. Uma pequena parcela 0,7% decorre do uso de fertilizantes nitrogenados que causam a volatilização de óxido nitroso, um GEE com potencial de aquecimento global 310 vezes maior que o do CO₂.

A Figura 5.8 apresenta os resultados da AICV para a categoria de impacto Aquecimento Global para todos os cenários avaliados.

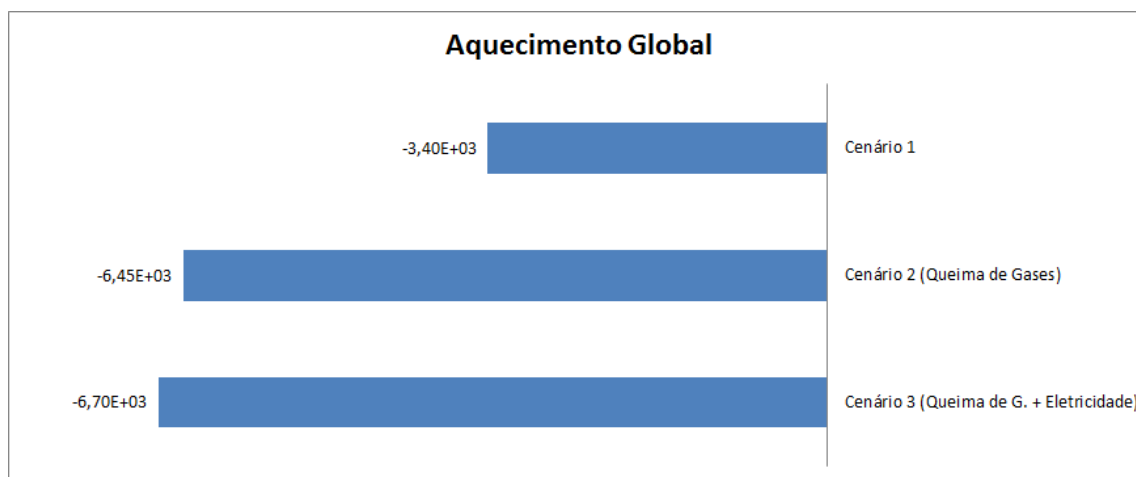


Figura 5.8. Resultados da AICV para o Aquecimento Global, em kg CO₂ eq./tcarvão.

O plantio de eucalipto consome carbono, na forma de gás carbônico, da atmosfera, e o fixa na forma de biomassa na floresta e no fim do processo em carvão vegetal, fazendo com que o resultado da categoria seja negativo em todos os cenários avaliados, indicando que a produção de carvão contribui para a diminuição do aquecimento global, independente da queima ou não dos gases da carbonização.

A queima de metano no Cenário (2) agrega mais 47% de redução de emissões de em comparação ao Cenário (1), e no Cenário (3) a geração de eletricidade no SIN ajuda a diminuir mais 4%, tornando este o melhor resultado dentre os cenários analisados. A queima do metano o transforma em CO₂, um gás com menor potencial de efeito estufa, e a geração de eletricidade evita a emissão indiretamente de GEE no SIN o qual consome, em parte, combustíveis fósseis para produzir sua eletricidade

5.3.3. Depleção da Camada de Ozônio

Os impactos desta categoria no ciclo de vida do carvão são pouco expressivos. O subsistema UC reportou baixas emissões de substâncias prejudiciais à camada de ozônio, sendo a maior parte derivada do sistema produtivo do eucalipto, com 99,35%. As emissões relacionadas a esta categoria vem de emissões secundárias, principalmente do sistema produtivo do Diesel, como pode ser observado na Figura 5.9.

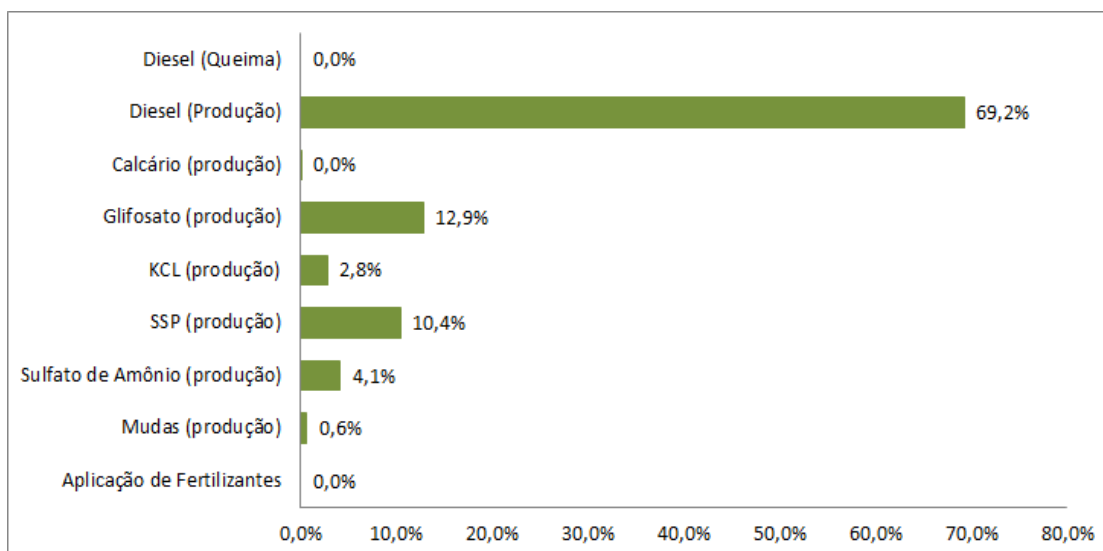


Figura 5.9. Subsistema florestal, porcentagem de contribuição por subsistema na categoria Depleção da Camada de Ozônio (Total: $1,43\text{E}-08$ kg CFC-11 eq./m³madeira)

A Figura 5.10 apresenta os resultados da AICV para a categoria de impacto Depleção da Camada de Ozônio, onde observa-se que o Cenário (3) apresentou o melhor resultado, novamente devido ao envio de eletricidade ao SIN, o que evita indiretamente a emissão de $6,08\text{E}-06$ kg CFC-11 eq. por tonelada de carvão produzida.

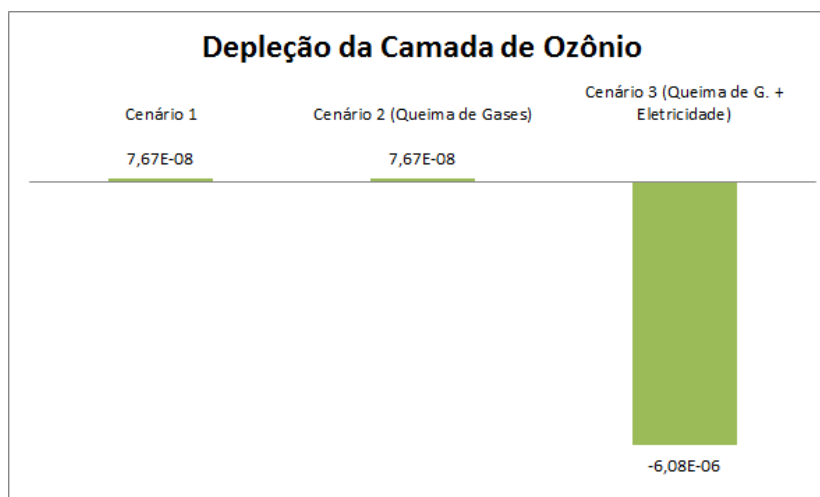


Figura 5.10. Resultados da AICV para a Depleção da Camada de Ozônio, kg CFC11eq./t_{carvão}.

5.3.4. Oxidação Fotoquímica

A Figura 5.11 apresenta os resultados da AICV para a categoria de impacto Oxidação Fotoquímica, em kg de C₂H₄ equivalente.

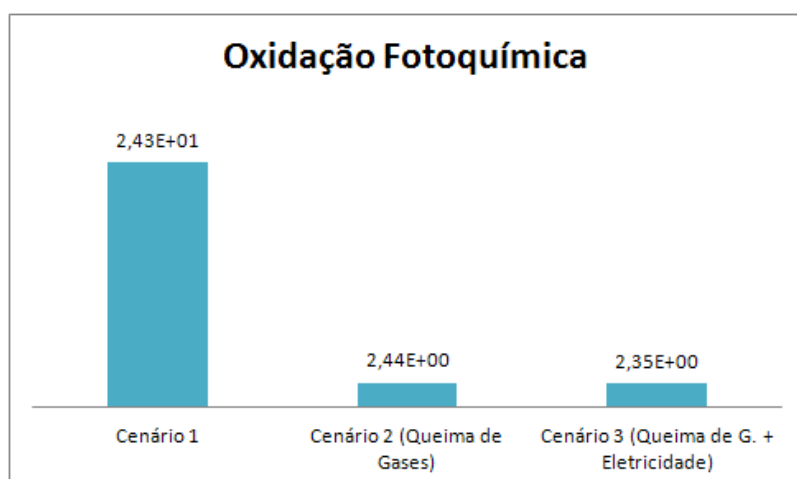


Figura 5.11. Resultados da AICV para a categoria Oxidação Fotoquímica, resultado em kg de C₂H₄ eq./t_{carvão}.

A grande parte do impacto vem das emissões relacionadas à carbonização, com 99,95% do resultado da categoria, sendo a emissão de monóxido de carbono a que mais contribui, com 47%, seguido o ácido acético, com 35%, do Metanol com 10%, do Acetado de Metila com 4% e do Metano com 2%. A queima dos gases impede a emissão destes componentes, reduzindo-os em gás carbônico e água, tornando os Cenários (2) e (3) melhores do ponto de vista desta categoria de impacto

5.3.5. Toxicidade Humana.

Parte dos impactos desta categoria deriva da carbonização da madeira, com destaque para a emissão do Fenol, o qual representa 11% do resultado. A outra parte deriva do subsistema Florestal com 88%, onde destaca-se o sistema produtivo do Diesel com 93,5% do impacto dentro deste subsistema, o que pode ser observado na Figura 5.12 que mostra a porcentagem de contribuição de cada subsistema dentro do subsistema florestal.

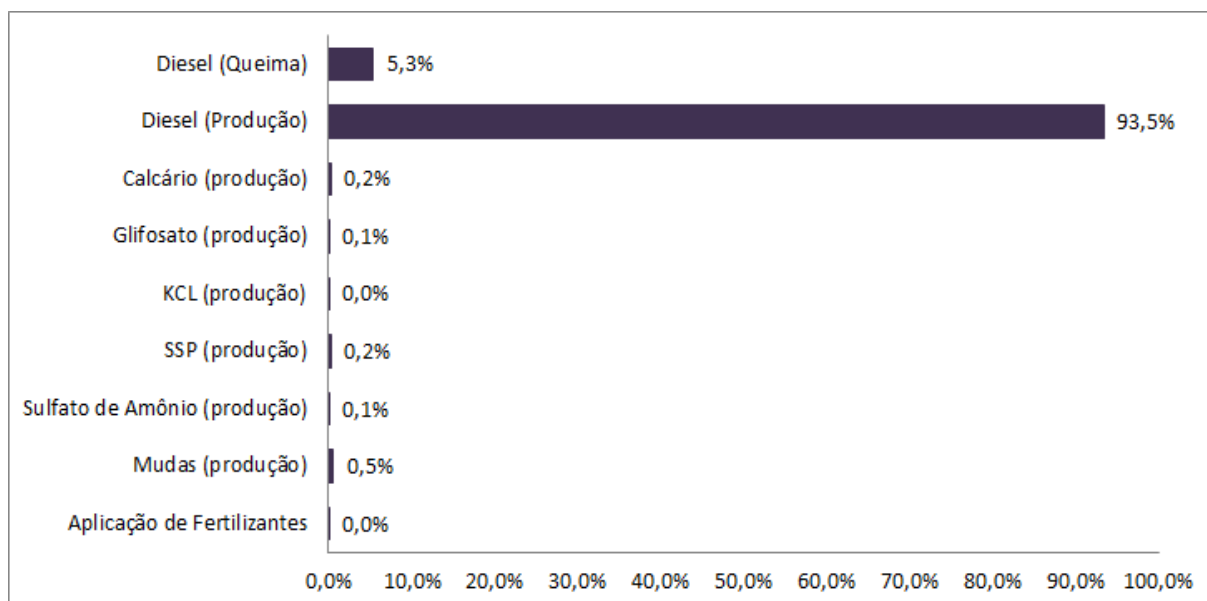


Figura 5.12. Subsistem produção florestal, porcentagem de contribuição por subsistema na categoria Toxicidade Humana (Total: 0,86 kg 1,4-DB eq./m³ madeira)

A Figura 5.13 apresenta os resultados da AICV para a categoria de impacto Toxicidade Humana nos cenários avaliados. No Cenário (2) parte do gás é queimado (90%), destruindo o Fenol e colaborando para diminuir o impacto mas, em contrapartida, a queima do gás produz material particulado e óxidos de nitrogênio, ao ponto de aumentar o impacto em relação ao cenário 1, os quais representam respectivamente 28% e 5% do impacto no cenário 2, sendo o restante derivado do subsistema florestal (64%). No Cenário (2) o fenol passa a representar apenas 1% do resultado.

No Cenário (3), o envio de eletricidade evita a emissão de compostos da categoria, a ponto de quase compensar indiretamente as emissões resultantes do ciclo de vida do carvão.

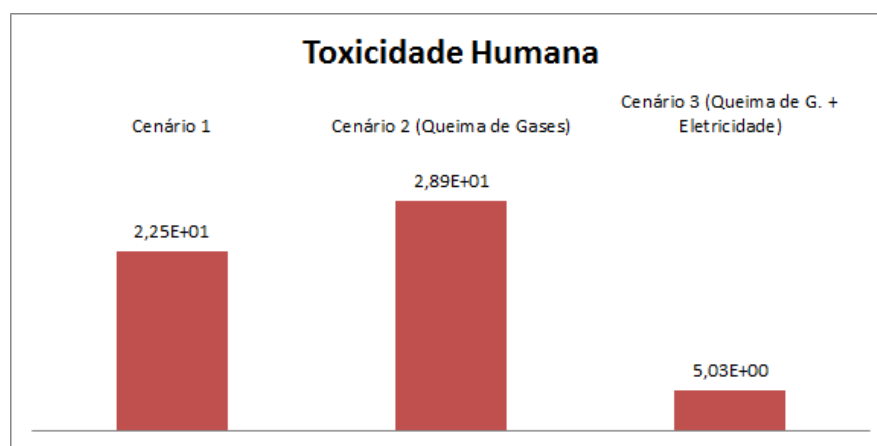


Figura 5.13. Resultados da AICV para a categoria Toxicidade Humana, em kg 1,4-DB eq.

5.3.6. Acidificação.

No ciclo de vida do carvão o principal responsável da categoria é a produção florestal, com 99% do impacto, sendo que neste subsistema os principais emissores são a queima do Diesel no maquinário agrícola, responsável pela emissão de NO_x e SO_x que representam de 79% e 5% do resultado da categoria, respectivamente. O restante dos impactos deriva da aplicação de fertilizantes, que causam à emissão de amônia (5%), e das cadeias produtivas do Diesel (7%), SSP (3%) e Sulfato de Amônio (1%).

A Figura 5.14 apresenta os resultados da AICV para a categoria Acidificação para os cenários avaliados. No Cenário (2) o impacto é aumentando em 52%, devido à emissão de óxidos de nitrogênio produzidos em razão da queima dos gases de carbonização. No Cenário (3), novamente, a eletricidade enviada ao SIN evita mais emissões indiretamente do que é produzido no ciclo de vida do carvão com queima de gases, tornando o resultado da categoria ambientalmente positivo, entretanto, de modo indireto e não local, já que estas emissões não são evitadas dentro do processo produtivo mas sim no ciclo produtivo de eletricidade no Brasil.

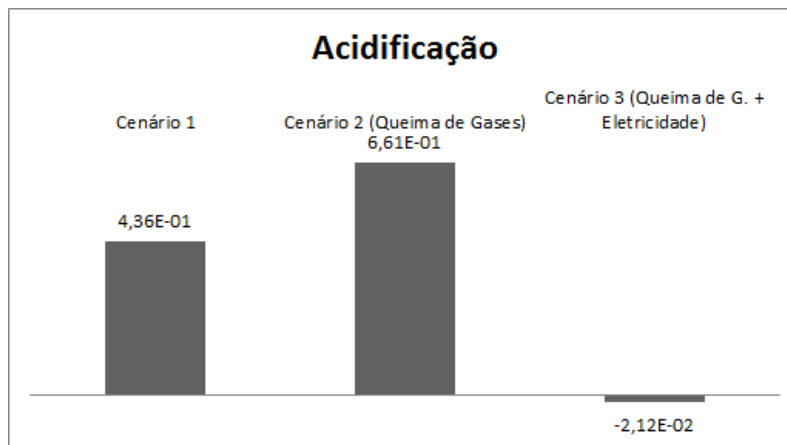


Figura 5.14. Resultados da AICV para a categoria Acidificação, em kg SO₂ eq.

5.3.7. Eutrofização.

A Figura 5.15 apresenta os resultados da AICV para a categoria Eutrofização. No Cenário (1), o principal responsável pelo impacto, com 87%, é a emissão pentóxido de fósforo devido à lixiviação relacionada à aplicação de fertilizantes fosfatados. No Cenário (2) o resultado da categoria é aumentado pela emissão de óxidos de nitrogênio devido à queima do gás de carbonização, aumentando o impacto em 13% em relação ao Cenário (1). No Cenário (3),

novamente o envio de eletricidade ajuda a compensar indiretamente os impactos da categoria, tornando este o melhor dentre os avaliados.

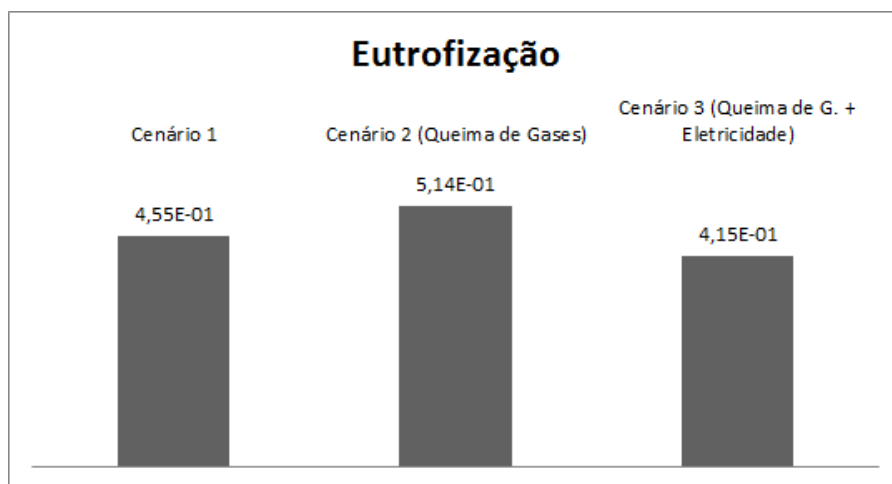


Figura 5.15. Resultados da AICV para a categoria Toxicidade Humana, em kg PO₄⁻³ eq.

5.3.8. Conclusões do capítulo

A Figura 5.16 apresenta os resultados da AICV para todas as categorias de impacto avaliadas neste estudo em valores percentuais em relação ao cenário com maior resultado dentro de cada categoria avaliada.

O Cenário (3) apresentou o melhor resultado dentre todas as categorias de impacto analisadas, devido à queima de gases em combinação com o envio de eletricidade ao sistema elétrico nacional. Deste modo, considerando o valor dos impactos em nível nacional, pode-se considerar este como o melhor dentre os avaliados.

O Cenário (2), que levou em conta apenas queima de gases, sem geração de eletricidade, foi positivo para as categorias aquecimento global, em razão da destruição do metano, toxicidade humana e oxidação fotoquímica, devido à queima fenol e hidrocarbonetos, respectivamente. Entretanto, nas categorias acidificação e eutrofização o efeito da queima de gases foi negativo em razão das emissões de óxidos de nitrogênio e particulados decorrentes da queima do gás.

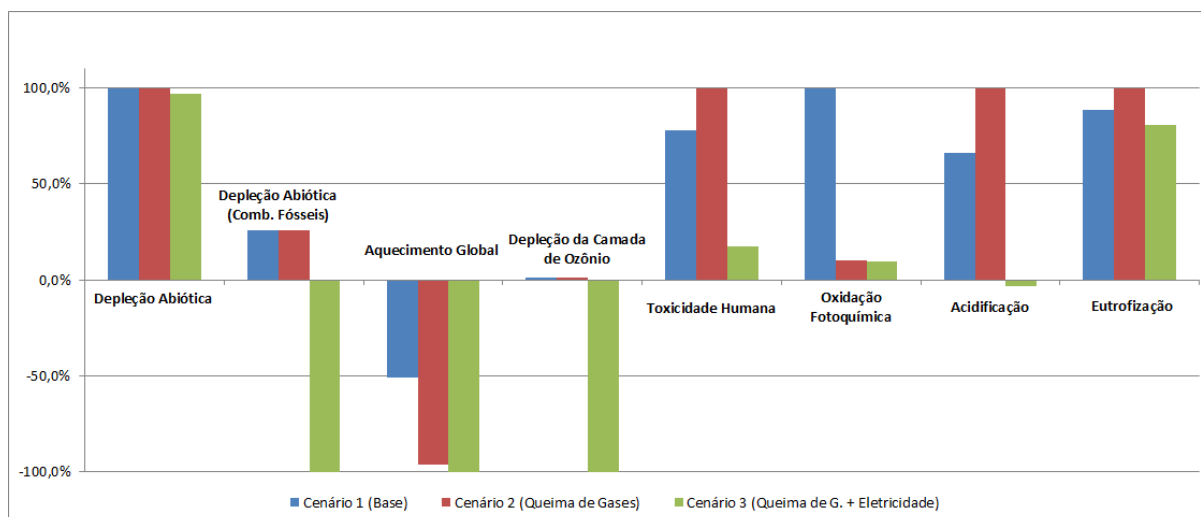


Figura 5.16. Resultados relativos da AICV para todas as categorias de impacto.

A Figura 5.17 mostra os resultados normalizados da caracterização, onde pode-se ter ideia da magnitude dos impactos relacionados à produção de carvão vegetal nas categorias selecionadas. Utilizou-se como fator de normalização as emissões mundiais do ano 2000, presentes na metodologia de normalização do CML.

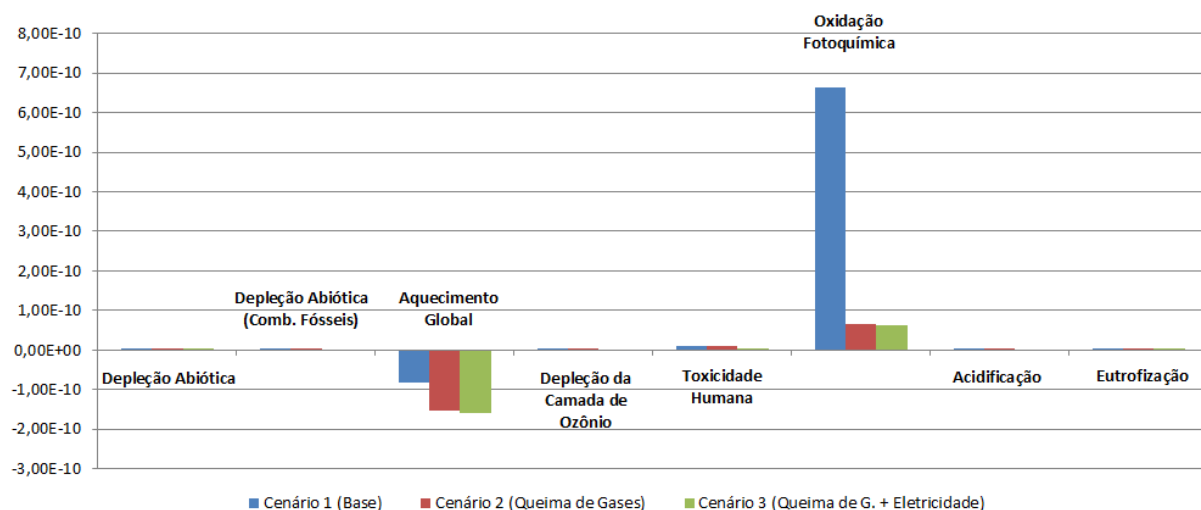


Figura 5.17. Normalização por categoria de impacto dos resultados da caracterização.

A normalização sugere que os impactos de maior magnitude, em escala global, são o aquecimento global e a oxidação fotoquímica. O primeiro apresenta resultado negativo, sendo, portanto, positivo ao meio ambiente. A oxidação fotoquímica apresentou o impacto de maior magnitude, exaltando a importância da queima do gás de carbonização para melhoria

da qualidade ambiental. Nota-se, também, que estes dois impactos podem ser substancialmente melhorados com a adoção da queima de gases e da geração de eletricidade.

Pode-se proceder a soma dos resultados normalizados como forma de obter um indicador ambiental único para cada cenário, como mostra a Figura 5.18.

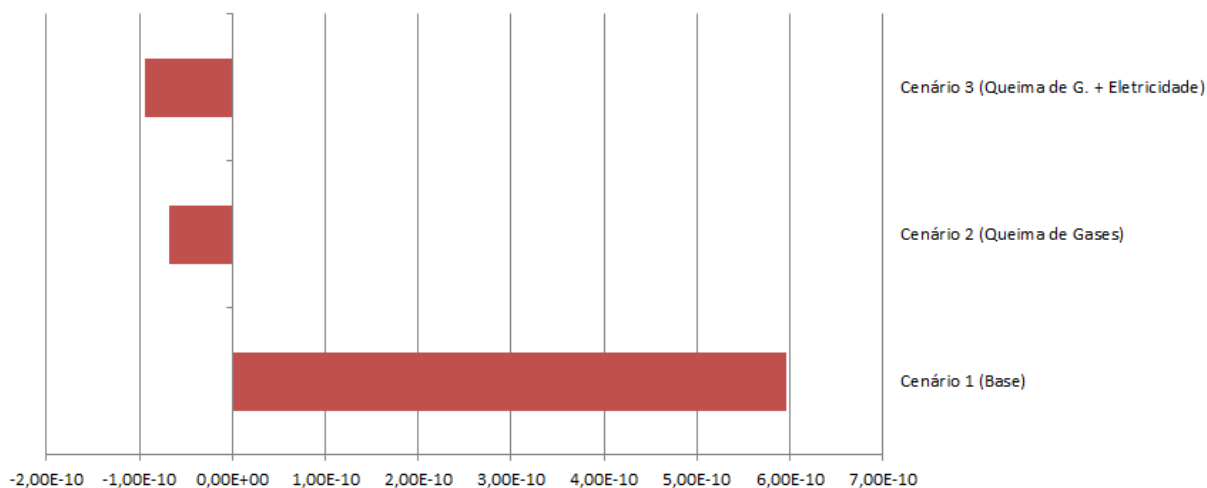


Figura 5.18. Soma dos resultados normalizados da AICV para os cenários avaliados.

Salienta-se que esta é uma etapa opcional na ACV, pois coloca no mesmo resultado valores que não podem ser comparados de maneira simples do ponto de vista ambiental, pois impactos como, por exemplo, toxicidade e eutrofização, podem ter significados diferentes, relativos ao ambiente no qual estão inseridos.

Segundo os resultados da Figura 5.18, pode-se concluir que a queima dos gases reduziu, em geral, 111% dos impactos relacionados ao ciclo de vida do carvão vegetal, já a queima em conjunto com a geração de eletricidade diminuiu estes impactos em 116%, porém de maneira indireta, evitando impactos relacionados à geração de eletricidade no SIN.

Nota-se que os resultados dos Cenários (2) e (3) são negativos, indicando que o ciclo de vida do carvão pode se tornar positivo do ponto de vista ambiental caso seja adotada a queima dos gases da carbonização e a geração de eletricidade.

Os impactos ambientalmente positivos dos cenários com queima mostram a importância do uso do carvão vegetal para a mitigação do aquecimento global e na economia de combustíveis fósseis, já que seu ciclo de vida é baseado no uso de uma fonte renovável de energia, o eucalipto de reflorestamento. É importante salientar que a normalização realizada é relativa a um ponto de vista global acerca dos aspectos ambientais avaliados.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

Hoje o Brasil desperdiça uma enorme quantidade de energia na indústria de carvão vegetal na forma de gases, os quais são emitidos diretamente para a atmosfera, causando poluição ambiental e gerando um grande desperdício de energia renovável. Considerando os resultados do trabalho, e o total de carvão produzido no Brasil (BEN, 2016), estima-se que 4 milhões de toneladas equivalente de petróleo são desperdiçadas anualmente no país na forma de gases de carbonização.

O estudo teve como base de dados os fornos retangulares de carbonização da UC da Plantar Siderúrgica localizada em Itacambira (MG) (Fazenda Tamanduá e Poções). Segundo os resultados do balanço energético, da energia da madeira posta em um forno retangular perde-se em torno de 36% na forma de gases, 54,7% são transformados em carvão vegetal, 4% em tiço, 4,1% representam perdas de calor nas paredes dos fornos e os 1,1% restantes correspondem a fluxos não contabilizados (diversos).

Para a recuperação da energia presente nos gases da carbonização, este trabalho encontrou um potencial de 57,125 MWt, ou 28,8% da energia total da madeira enfiada (com base no calor recuperado e no PCI da Madeira) e um PCI médio de 1268 kJ/kg. Este valor foi estabelecido considerando o funcionamento de 120 fornos retangulares com funcionamento em batelada e 18 dias de ciclo em um sistema de *cluster*, concebido para garantir o fornecimento homogêneo de energia ao grupo gerador. O tempo ótimo de operação do sistema foi de 3,6 horas, sendo este o intervalo entre o início de operação de cada forno, capaz de garantir uma potência homogênea no sistema.

Para converter os gases da carbonização em eletricidade foram avaliados três ciclos termodinâmicos, o ciclo Rankine a vapor, o ORC e a EFGT. As três tecnologias tiveram seus ciclos modelados considerando o ar como dissipador de calor do ciclo, já que nas UCs geralmente não há água suficiente para refrigerá-los. Portanto, tanto o ORC quanto o ciclo a vapor consideraram o uso de um condensador a ar.

O ciclo a vapor foi modelado para duas condições de parâmetros de vapor na entrada da turbina, 22bar/300°C e 45bar/450°C, os quais apresentaram eficiências elétricas de 20,4%, 24,8%, respectivamente. A EFGT considerou a existência de um ciclo com e sem regeneração e três diferentes temperaturas de entrada de ar comprimido na turbina, 715°C, 850°C e 900°C. No ciclo sem regeneração, devido à baixa temperatura de chama, apenas a temperatura de 715

°C pode ser avaliada, encontrando-se uma eficiência de 11,4%. Para o ciclo com regeneração a eficiência para cada temperatura foi de 15,6%, 18,1% e 19,3% para cada temperatura, respectivamente. O ORC foi modelado para três diferentes fluidos de trabalho, o MDM, o tolueno e o n-pentano, os quais apresentaram eficiências de 20,6%, 23,7% e 13,0%, respectivamente.

Os ciclos foram comparados através de uma análise econômica, onde o ORC apresentou os melhores resultados de acordo com indicadores econômicos utilizados, com TIR igual a 11,5%. No caso do ORC é necessário um preço de venda de eletricidade de R\$ 272,50 o MWh para que o projeto atinja o equilíbrio financeiro (VPL igual a zero), já para os casos do ciclo a vapor e EFGT a energia deve ser comercializada acima de R\$ 313,00 o MWh.

Avaliando o total de carvão produzido no *cluster* de fornos e as tecnologias avaliadas, estima-se uma produtividade específica de eletricidade de 0,775 a 0,966 MWh/t_{carvão}. Considerando que os estado de Minas Gerais já chegou a produzir seis milhões de toneladas de carvão vegetal anualmente, a recuperação dos gases da carbonização para a geração de eletricidade pode representar a geração de até 6360 GWh por ano, o equivalente à aproximadamente a 55% do consumo de energia residencial do estado em 2014 (BEN, 2015).

Hoje a tecnologia envolvida na queima dos gases de carbonização encontra-se em estágio de desenvolvimento, porém, a adoção de algumas estratégias tem tornado possível queimar os gases da carbonização com sucesso. A primeira através do pré-aquecimento dos gases, que tem a capacidade de colocar a mistura acima de seu limite inferior de inflamabilidade, e a segunda, no uso conjunto de fornos em diferentes estágios da carbonização, o que melhora o poder calorífico médio e consequentemente a inflamabilidade dos gases. A estratégia do pré-aquecimento dos gases foi analisada matematicamente no Capítulo 3, através do método da ISO 10156 e do método da TAC, a qual mostrou que os gases gerados nos fornos retangulares possuem melhor inflamabilidade notavelmente a partir da metade do processo de carbonização (aproximadamente 60 horas), e que a temperatura necessária para que o gás atinja a inflamabilidade, em sua concentração mais pobre de combustíveis, é de 650 °C.

Considerando que a temperatura mínima de trabalho medida no queimador atual da Plantar foi no entorno de 800 °C, é possível pré-aquecer os gases até 650 °C e fazer com que eles atinjam a inflamabilidade na pior situação avaliada. Entretanto, como foi apresentado no Capítulo 3, isso mostra que é preciso de um tempo de pré-aquecimento dos gases para que eles possam ser queimados com eficiência, o que pode ser realizado com o aumento do tempo de residência dos gases no interior do queimador, como foi observado no queimador atual da

Plantar, construído grande volume interno e, conseqüentemente, alto tempo de residência. Este queimador apresentou um período ininterrupto de queima por 9 dias e sem a necessidade de uso de combustível adicional, sendo a parada realizada para manutenção do equipamento.

A Análise do Ciclo de Vida foi utilizada como ferramenta ambiental para avaliar a mudança nos aspectos ambientais no ciclo de vida do carvão vegetal causados pela queima dos gases e pela geração de eletricidade. A queima dos gases foi positiva para o aquecimento global, devido à destruição do metano produzido no processo e carbonização, na toxicidade humana e oxidação fotoquímica, devido à queima fenol e hidrocarbonetos, que também são produzidos em grandes quantidades na carbonização. A recuperação de eletricidade foi positiva em todas as categorias avaliadas, sendo que ele foi capaz de compensar indiretamente boa parte dos impactos gerados no sistema produtivo do carvão, podendo, inclusive, compensar o uso de combustíveis fósseis no ciclo de vida do carvão e gerar um grande excedente de energia renovável no Sistema Interligado Nacional.

Para a produção de carvão vegetal foi encontrado uma relação entre o *input* de energia fóssil e *output* de energia renovável anual de 5,9 unidades, para a produção conjunta de carvão e eletricidade encontrou-se uma relação de 6,6 unidades, sendo possível recuperar 12% da energia inicial da madeira.

Os impactos de maior magnitude, em escala global, no sistema produtivo do carvão são o aquecimento global, e a oxidação fotoquímica. O primeiro apresenta resultado positivo ao meio ambiente, devido ao sequestro de carbono pela floresta de eucalipto, o qual é capaz de capturar 3,4 tCO₂ eq. por tonelada de carvão produzida, sendo que este valor pode ser significativamente melhorado pela adoção da queima de gases e da geração de energia (em 47% e 51%, respectivamente).

A oxidação fotoquímica resultou no impacto de maior magnitude, devido as emissões de hidrocarbonetos na carbonização. O que mostra a importância da queima do gás para melhoria da qualidade ambiental na UC.

De acordo com os resultados normalizados e agrupados da ACV, a queima dos gases melhorou, em geral, 111% dos impactos relacionados ao ciclo de vida do carvão vegetal, já a queima em conjunto com a geração de eletricidade diminuiu estes impactos em 116%, porém de maneira indireta, evitando impactos relacionados à geração de eletricidade no SIN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 16401: instalações de ar condicionado: sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008.
- ABRAF. Associação brasileira de produtores de florestas plantadas. Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2011. Brasília, 2012. 145p.
- Al-Attab, K., & Zainal, Z. (2009). Performance of High Temperature Heat Exchangers in Biomass Fuel powered Externally Fired Gas Turbine Systems. *Renewable Energy* Vol.35, 913 - 920. 5, 341 - 350.
- Al-attab, K.A., Zainal, Z.A. Externally fired gas turbine technology: A review. *Applied Energy* Volume 138, 15 January 2015, Pages 474–487.
- Alfaro, J. A., Roa, j., Ferrús, e., & Lcuona, A. (2006). Integrated Pressurized Gasification of Biomass for Small Gas Turbines. *ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air*.
- Almado M.S. R. Setor de Carvão Vegetal Renovável. Gerência de Pesquisa e Meio Ambiente, Campinas – SP ArcelorMittal BioEnergia. Apresentação, Congresso da Madeira (2014). <http://congressomadeira.com.br/>
- Althaus, H.J.; Chudacoff, M.; Hischer, R.; Jungbluth, N.; Osses, M.; Primas, A. Life cycle inventories of Chemicals Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland (2007)
- AMS, 2004. Associação Mineira de Silvicultura – AMS. Silvicultura desenvolvimento social, econômico e ambiental com plantios florestais. Encarte. 2004.
- AMS, 2009. Anuário Estatístico 2009. Belo Horizonte, 2009. [ONLINE] Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>.
- AMS, 2012. Anuário Estatístico 2012. Belo Horizonte, 2009. [ONLINE] Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>.
- ANEEL, 2016a. BIG - Banco de Informações de Geração. [ONLINE] Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. [Acessado em 15 de Agosto de 2016].
- ANEEL, 2016b. Agência Nacional de Energia Elétrica. [ONLINE] Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br>. [Acessado em 30 de Junho de 2016].

Ansi/Isa TR12.13.01-1999 (R2005), Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors (technical report).

Antal, M.J. and M. Gronli, 2003. The art, science and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*: pp. 1619-1640.

Aqylon, 2016. ORC & turbine technology. [ONLINE] Disponível em: <http://www.aqylon.com>. [Acessado em 23 de Março de 2016].

ArcelorMittal, 2012. Formulário do documento de concepção de projeto para atividades de Projeto de MDL. Redução de Emissões de Metano na Produção de Carvão Vegetal na ArcelorMittal Brasil. 30/07/2012

Arruda T. P. M. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos Retangulares. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa 2005.

Arruda T. P. M.; Pimenta A. S.; Vital B. R.; Lucia R. M. D.; Acosta F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. *Rev. Árvore* vol.35 no.4 Viçosa July/Aug. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000500020>

Arvay P., Muller M.R., Ramdeen V. Economic implementation of the organic Rankine cycle in industry. *ACEEE Summer Study Energy Efficiency Indust* (2011), pp. 12–22

Baina F., Malmquist A., Alejo L., Palm B., Fransson T. h. Analysis of a high-temperature heat exchanger for an externally-fired micro gas turbine. *Applied Thermal Engineering* 75 (2015) 410e420

Baker, A. J. Charcoal industry in the U.S.A. *Symposium on Forest Products Research International—Achievements and the Future: Vol. 5*. 1985 April 22-26: Pretoria.

Banco Mundial. 2010. Plantar Green Pig Iron Project : environmental assessment : Relatório de avaliação dos impactos ambientais e sociais (Português), 68p. Disponível em: <www.worldbank.org/pt/country/brazil>. Acesso em: 20 de dez. de 2014

Barcellos D. C.; V. B. R.; Silva, J. S.; Pimenta, A. S.; Couto, L. C. Cellular Furnace as a Pollution and Energy Generation Control Source in Carbonization Using Container Oven. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 4, p. 335-342, 2004

Barcellos, D. C. Forno contêiner para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição. 2002. 85f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de viçosa. 2002.

Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Elsevier/Academic Press: Kidlington(UK)/Burlington (MA), 365 pp., 2010.

- Bauer, P. E. Metodologia e Procedimentos para a Consideração Ambiental no Projeto de Processos Químicos. 2003. 309 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2003.
- BCA (2008), Code on Envelope Thermal Performance for Buildings, Building and Construction Authority (BCA), Singapore, available at: [www.bca.gov.sg/ PerformanceBased/others/ RETV.pdf](http://www.bca.gov.sg/PerformanceBased/others/RETV.pdf) (Acessado em 20/05/2015).
- Bejan A, Tsatsaronis G M M. Thermal design and optimization. Jonh Wiley & Sons, New York (1995)
- Bellais, M.; Davidsson, K.O.; Liliedahl, T.; Sjöström, K.; Pettersson, J.B.C. Pyrolysis of large wood particles: a study of shrinkage importance in simulations, *Fuel* 82 (2003) 1541–1548.
- BEN, 2015. Empresa de Pesquisa Energética (EPE); Balanço Energético Nacional 2015, Ministério das Minas e Energia; www.mme.gov.br, acessada em Janeiro de 2016.
- BEN, 2016. Empresa de Pesquisa Energética (EPE); Balanço Energético Nacional 2016, Ministério das Minas e Energia; www.mme.gov.br, acessada em Junho de 2016.
- Biocarbo, 2007 - Workshop Madeira Energética 29 de maio de 2007. Sede BNDES - subsolo/ Rio de Janeiro. "Pirólise e Carboquímica no Brasil - bases para desenvolver uma nova indústria", Maria Emília Antunes Rezende, BIOCARBO
- Biomassa, 2013. *Jornal da Biomassa*, edição 09. http://issuu.com/jornalbiomassabr/docs/jornal_biomassa_br_ed-09
- Bitola, 2016. BTOLA Indirectly fired gas turbine technology. [ONLINE] Disponível em: <http://www.btola.com/ifgt-technology.html>. [Acessado em 30 de Junho de 2016].
- Blondeau, J.; Jeanmart, H. Biomass pyrolysis at high temperatures: prediction of gaseous species yields from an anisotropic particle, *Biomass Bioenergy* 41 (2012) 107–121.
- Boehm, R.F. Design analysis of thermal systems. John Wiley & Sons, 1º ed. New Jersey:USA, 288pp., 1987.
- Boer, J., Boer, E., Jager, J., 2007. LCA-IWM: A decision support tool for sustainability assessment of waste management systems. *Waste Management* 27, 1032–1045.
- Bohlmann J.. 2011. Technical and commercial aspects for development of biomass and biogas projects. USELF – Ukraine Sustainable Energy Lending Facility [ONLINE] Disponível em: <http://www.uself.com.ua>. [Acessado em 25 de Junho de 2016].
- Boonmee, N. 2004. Theoretical and Experimental Study of Autoignition of Wood. In Department of Fire Protection Engineering. College Park, Maryland: University of Maryland.

- Braga, N. P. Quantidade e qualidade das emissões atmosféricas na carbonização da madeira. II Fórum Nacional sobre carvão vegetal. Arcelor Mittal Bioenergia. GDET - 28 de Outubro de 2010
- Branchini, L.; de Pascale, A.; Peretto, A. Systematic comparison of ORC configurations by means of comprehensive performance indexes. *Appl. Therm. Eng.* 2013, 61, 129–140.
- Brander M., Wylie C. The use of substitution in attributional life cycle assessment. *Greenhouse Gas Measurement & Management* 1. 2011, 161–166.
- Brito, J. O. Desafios e perspectivas da produção e comercialização do carvão vegetal. 2010. II Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal. Sete Lagoas – MG. 2010.
- Brito, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. Documentos florestais. Universidade de São Paulo, Escola superior de agricultura “luiz de queiroz”, Departamento de Ciências Florestais. Piracicaba (9): 1 –19, mai. 1990
- Brito, J. O., Barrichelo L. G. Considerações Sobre a Produção de Carvão Vegetal com Madeiras da Amazônia. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Departamento de Silvicultura da E.S.A.L.Q. – USP. IPEF – Sér. Téc. Piracicaba v.2 n.5 p. 1 – 25 Mar. 1981
- Brownsort, P. A. Biomass Pyrolysis Processes: Review of Scope, control and Variability. UKBRC Working Paper 5. UK Biochar Research Centre. December 2009. www.biochar.org.uk
- BSI, 2011, PAS 2050:11. Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services.
- Burcat, 2016. [Online] Prof. Burcat's Thermodynamic Data. Laboratory for Chemical Kinetics, Institute of Chemistry, Eötvös University (ELTE), Budapest, Hungary.<http://burcat.technion.ac.il/dir/>. acesso em 25/01/2016
- Burgess, M.J.; Wheeler, R.V. The lower limit of Inflammation of Mixtures of the Paraffin Hydrocarbons with air, *Journal of Chemical society*, 1911
- Camporeale S. M., Pantaleo A. M., Ciliberti P. D., Fortunato B. Cycle configuration analysis and techno-economic sensitivity of biomass externally fired gas turbine with bottoming ORC. *Energy Conversion and Management*, Volume 105, 15 November 2015, Pages 1239-1250
- Campos, A.D. (2007). Técnicas para produção de extrato pirolenhoso para uso agrícola. Pelotas, Embrapa CPACT. 8p. (Circular Técnica, 65).
- Campos, C. E., Escobar, J. C. Venturini, O. J. Silva, E. E. Melián, V. Marques, D. Dotto, F. R. Gialluca, V. Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low

temperature enhanced geothermal system in Brazil, *Applied Thermal Engineering*, v.52, p.109-119, 2013.

Cardoso M. T., Damásio R. A. P., Carneiro A. C. O., Jacovine L. A. G., Vital B. R., Barcelos D. C. Construção de um Sistema de Queima de Gases da Carbonização para Redução da Emissão de Poluentes. *Cerne*, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, jul.2010

Carneiro, A. C. O., Castro, A. F. N. M., Castro, R. V. O. Quantificação e qualificação de resíduos da colheita florestal e da produção de carvão vegetal para geração de energia elétrica. Universidade Federal De Viçosa Centro De Ciências Agrárias Departamento De Engenharia Florestal Viçosa – MG, Novembro – 2012a

Carneiro, A. C. O.; Lana, A. Q.; Oliveira, A. C.; Pereira, B. L. C.; Salles, T. T. Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica da Produção de Carvão Vegetal em Fornos Circulares com Baixa Emissão de Poluentes. Centro de Pesquisas em Economia Aplicada – CEPEA/ESALQ. Viçosa, 2012b

Carrara, S. (2010). Small scale biomass power generation. Tese de Doutorado (PhD in Energy and Environmental Technology). University of Bergamo.

Carrier, B. Projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo. Disponível em: <http://www.ecolatina.com.br/pdf/anais/Workshop_Mudancas_Climaticas_Siderurgia/BenoitCarrier.pdf> Acesso em: 25 de novembro de 2014.

Castro, A. F. N. M. Potencial dos resíduos florestais e dos gases da Carbonização da madeira para geração de energia Elétrica. Dissertação (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal – Universidade Federal de Viçosa, 2014.

CCEE, 2016. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. [ONLINE] Disponível em: <https://www.ccee.org.br>. [Acessado em 30 de Junho de 2016].

Cengel, Y. A & Boles, M. A. 2005 *Thermodynamics: An Engineering Approach* (5th). McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. Boston: McGraw-Hill.

CGEE, 2014. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Nota Técnica, letra C do TR: “Mapeamento de ações institucionais para sustentabilidade da produção de ferro-gusa a partir de carvão vegetal.” Subsídios 2014 ao Plano Siderurgia do MDIC: Modernização da produção de carvão vegetal. Contrato Administrativo CGEE/MDIC 49/2013. Brasília, 2014

Channiwala, S.A.; Parikh, P.P. A unified correlation for estimating HHV of solids, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81:1051–1063, 2002. doi: 10.1016/S0016-2361(01) 00131-4. ISSN: 0016-2361.

- Chemical Engineering, 2016. Chemical Engineering Plant Cost Index. [ONLINE] Disponível em: <http://www.chemengonline.com/pci-home>. [Acessado em 30 de Junho de 2016].
- CMLCA, 2016. Scientific Software for LCA, IOA, EIOA, and More. [ONLINE] Disponível em: <http://www.cmlca.eu>. [Acessado em 20 de Novembro de 2015].
- Cocco D., Deiana P., Cau G. Performance evaluation of small size externally fired gas turbine (EFGT) power plants integrated with direct biomass dryers. *Energy*, Volume 31, Issues 10–11, August 2006, Pages 1459–1471
- Crombie, K.; Mašek, O. Investigating the potential for a self-sustaining slow pyrolysis system under varying operating conditions. *Bioresource Technology*. Volume 162, June 2014, Pages 148–156
- Dahlgren E, Goçmen C, Lackner K, Ryzin G V. Small Modular Infrastructure. *The Engineering Economist*, 58:231–264, 2013
- Datta A., Ganguly R., Sarkar L. Energy and exergy analyses of an externally fired gas turbine (EFGT) cycle integrated with biomass gasifier for distributed power generation. *Energy*, Volume 35, Issue 1, January 2010, Pages 341–350
- Datta, A., Gangouly, R., e Sarkar, L. (2009). Energy and exergy Analyses of an Externally Fired Gas Turbine (EFGT) Cycle Integrated with Biomass Gasifier for Distributed Power Generation. *Energy* Vol.3
- Daugaard, D. E. e Brown, R. C., 2003, “Enthalpy of Pyrolysis for several types of Biomass,” *Energy and Fuels*, 17, PP. 934-939
- Declaye, S.; Quoilin, S.; Guillaume, L.; Lemort, V. Experimental study on an open-drive scroll expander integrated into an ORC (Organic Rankine Cycle) system with R245fa as working fluid. *Energy*, Volume 55, 15 June 2013, Pages 173–183
- Di Blasi. Modeling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis. *Journal Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, No. 1, 2008, pp. 47-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2006.12.00>
- Dlugogorski, B.Z. Hichens, R.K., Kennedy, E.M. Water vapour as an inerting agent. *Proc Halon Options Technical Working Conf*, Albuquerque (1997), pp. 7–18
- Doat, J. & Petrof, G. La Carbonization des Bois Tropicaux. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent sur Marne, (159): 55-64, 1975.
- Drescher, U.; Brüggemann, D. Fluid selection for the organic rankine cycle (ORC) in biomass power and heat plants. *Appl. Therm. Eng.* 2007, 27, 223–228.

Duarte, W. V; Mota S. Fornos Retangulares com Queimador Central, Experiência Viena Siderúrgica. Apresentação, 2010. http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_experiencias_central_15139.pdf

Dwyer, J.G. Hansel, T. Philips Temperature Influence on the Flammability Limits of Heat Treating Atmospheres. Heat Treating And Surface Engineering: Proceedings of the 22nd Heat Treating Society Conference and the 2nd International Surface Engineering Congress. September 2003, Pages 24–28

Ecoinvent Centre: ecoinvent data v3.01. Online Database available at <http://www.ecoinvent.org>. In: ecoinvent Association, Zürich (2013)

Ecoinvent, 2006. Ecoinvent Database v.3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf
Effects of Air Distribution on Pollutant Emission and Flame Characteristics of Open Buoyant Wood Combustion by Peter Kariuki Nyahoro - 2006 - 379 pages. Resenha do livro no Google Books, <http://books.google.com/> acesso em 25/01/2015

El-Halwagi, M.M. Sustainable design through process integration: fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement. Massachusetts: Elsevier, 422 pp., 2012.

Fantozzi, F.; Colantoni, S.; Bartocci, P.; Desideri, U. Rotary Kiln Slow Pyrolysis for Syngas and Char Production from Biomass and Waste — Part II: Introducing Product Yields in the Energy Balance. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 129 (4), 908-913 (Jan 05, 2007) (6 pages) doi:10.1115/1.2720539.

FAO - Food and agriculture organization of the united nations. Simple technologies for charcoal making - Mechanical Wood Products Branch. Forest Industries Division. FAO Forestry Department. Forestry paper 41. Rome, 1987

FAO, 2012. FAOSTAT data. 2012 3 May; Available from: <http://faostat.fao.org/>.

Fernández F.J., Prieto M.M., Suárez I., 2011, Thermodynamic analysis of high-temperature regenerative organic Rankine cycles using siloxanes as working fluids, Energy, 36, 5239–5249

Ferreira, C. A. Caracterização anatômica, secagem e carbonização da madeira de clones de Eucalyptus e de espécies do Cerrado. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Ferreira, J.V.R. Análise do ciclo de vida dos produtos. Gestão Ambiental. Lisboa: Instituto Politécnico de Viseu, 2004. 80 p.

- Ferreira, O. C. Teor de Carbono em Combustíveis da Biomassa. Economia & Energia Ano X –No 57: Agosto-Setembro 2009 ISSN 1518-2932. Texto para Discussão: http://ecen.com/eee57/e_ee57p/teor_de_carbono_em_combustiveis_da_biomassa.htm
- Finnveden G. and Moberg Å., 2005a. Environmental systems analysis tools - an overview. *Journal of Cleaner Production* 13:1165-1173.
- Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., Moberg, A., 2005b. Life cycle assessment of energy from solid waste-part 1: general methodology and results. *Journal of Cleaner Production*, 13, pp. 213-229.
- Gadhamshetty, V., Nirmalakhandan, N., Myint, M., Ricketts, C. Improving Air-Cooled Condenser Performance in Combined Cycle Power Plants. *Journal of Energy Engineering* 132(2) July 2006.
- Galdiano; G. P. (2006) Inventário do ciclo de vida do papel offset produzido no Brasil. 2006. 280 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química, São Paulo.
- Garcia-Perez, M., Garcia-Nunez, J. A., Kruger, C., Kantor, S. Methods for Producing Biochar and Advanced Bio-fuels in Washington State. Part 3: Literature Review, Technologies for Product Collection and Refining. Biological Systems Engineering Department, Washington State University. May 2012. Publication no. 12-07-034
- Gard, K O. Biomass based small scale combined heat and power technologies, Master Thesis, Lulea University of Technology, 2008.
- Genera, 2016. Genera SpA: Home Page. [ONLINE] Disponível em: <http://www.geprogetti3i.it> [Acessado em 15 de Julho de 2016].
- Glassman I.; Yetter. R.A. Combustion (4th ed.), Elsevier Academic Press, San Diego (2008). ISBN: 978-0-12-088573-2
- Goedkoop, M.; Oele, M.; Schryver, A.; Vieira, M. 2008. SimaPro Database Manual Methods library. PRe' Consultants, Netherlands.
- Gomes, A. G. M. F, Encarnação F. The environmental impact on air quality and exposure to carbon monoxide from charcoal production in southern Brazil. *Environmental Research*. Volume 116, July 2012, Pages 136–139
- Gomez, C. Velo, E., Barontini, F., Cozzani, V. Influence of Secondary Reactions on the Heat of Pyrolysis of Biomass, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, 48, 10222–10233

- Goteti, A. Experimental Investigation and Systems Modeling of Fractional Catalytic Pyrolysis of Pine. Thesis. Degree Master of Science in the School of Chemical and Biomolecular Engineering. Georgia Institute of Technology. December 2010
- Gronnow, M.J., Budarin, V.L., Mašek, O., Crombie, K.N., Brownsort, P.A., Shuttleworth, P.S., Hurst, P.R., Clark, J.H., 2013. Torrefaction/biochar production by microwave and conventional slow pyrolysis – comparison of energy properties. *GCB Bioenergy* 5, 144–152.
- Guinée, J.B.; Gorée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692 pp.
- Guo, T.; Wang, H. X.; Zhang, S. J. Selection of working fluids for a novel low temperature geothermally-powered ORC based cogeneration system. *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issue 6, June 2011, Pages 2384–2391
- Gustafsson, M. Pyrolysis for heat production - Biochar the primary byproduct. Master's Thesis, University of Gävle, Faculty of Engineering and Sustainable Development, 2013.
- Guyer, E. C. (1999) Handbook of applied thermal design, 1st edn. CRC Press, New York
- Hamanaka B, Zhao H and Sharpe P 2009 Comparison of Advanced Cooling Technologies Efficiency Depending on Outside Temperature (Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory - U.S. Department of Energy National Laboratory)
- He a W; Han a, D; Yue a, C; Pu a, W. A Combined Thermal System with an Air-cooled Organic
- Heyns, J.A., 2008. “Performance characteristics of air-cooled steam condenser incorporating a hybrid (dry/wet) dephlegmator.” Master's thesis, University of Stellenbosch, South Africa.
- Hudson, 2016. Hudson Products Corporation. [ONLINE] Disponível em: www.hudsonproducts.com. Acessado em 25 Março de 2016
- Hurley, M.J., 2016. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 5th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2016.
- IBA, 2015. Brazilian Tree Industry 2015: a report of the Brazilian Tree Industry, Brasilia, p. 62. <http://www.iba.org/images/shared/iba_2015.pdf>.
- IEA, 2010. World Energy Outlook 2010, Internacional Energy Agency (IEA), Paris, France (2010).

IEA, 2012. Key World Energy STATISTICS 2012. . Paris: [s.n.], 2012. Disponível em: www.iea.org

IEA, 2015. 2014 Key World Energy Statistics. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/keyworld2014.pdf>. Acessado em 6/04/2015.

IEA, 2016. IEA bioenergy annual report, <http://www.energytech.at/pdf/iea_bereport06.pdf>; 2006.

ILCD, 2016, ILCD Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed Guidance. [ONLINE]. Disponível em: www.lct.jrc.ec.europa.eu, [Acessado em 30 de Julho de 2016].

INMET – Instituto Nacional De Meteorologia. [ONLINE] Disponível em: www.inmet.gov.br. [Acessado em: 23 de Agosto de 2016].

IPCC 2007: Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

IPCC AR5, 2014. Climate Change 2014 Synthesis Report.

IPCC, 2003: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan, ISBN 4-88788-003-0.

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Hayama, Japan.

ISO 10156 – Gases and Gas Mixtures – Determination of Fire Potential and Oxidizing Ability for the Selection of Cylinder Valve Outlets (2010) (Brussels)

ISO 14040 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Brussels: International Organisation for Standardisation; 2006a

ISO 14044 – Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. Brussels: International Organisation for Standardisation; 2006b

Keirstead J., N. Shah (Eds.), Urban energy systems – an integrated approach, Routledge, NY (2013), p. 363

Jabbar A. A., Amellal S., Schiavon, M. Sorption and leaching of ¹⁴Cglyphosate in agricultural soils. Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag, 2008, 28 (3), pp.419-428.

- Joback K.G., Reid R.C., "Estimation of Pure-Component Properties from Group-Contributions", Chem. Eng. Commun., 57, 233–243, 1987
- Kautz, M., & Hansen, U. (2007). The externally fired gas turbine (EFGT-Cycle) and simulation of key components. Applied Energy Vol.84 , 795 - 805.
- Kim, K. H; Ko, H J. Exergetical performance assessment of organic Rankine cycle with superheating. App. Mech. Materials, vol. 234, pp. 69-73, 2012.
- Kiperstok, A.; Coelho, A.; Torres, E.A.; Meira, C.C.; Bradley, S.P.; Rosen, M. Prevenção da Poluição: Tecnologias e Gestão Ambiental. CNI/SENAI, Brasília, 2002.
- Kreith F., Boehm R. F. Heat and Mass Transfer: Mechanical Engineering Handbook, Boca Raton: Ed. Frank Kreith, 1999.
- Kumar A, Cameron JB, Flynn PC. Biomass power cost and optimum plant size in western Canada. Biomass Bioenergy 2003;24:445–64.
- Kuparinen K., Heinimö J., Vakkilainen E., 2014, World's largest biofuel and pellet plants – geographic distribution, capacity share, and feedstock supply, Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 8(6), 747-754
- Lackner M, Palotas A, Winter F (2013) Combustion: from basics to application. Wiley, New York. ISBN 978-3-527-33376-9
- Lai, N. A., Wendland, M., Fischer, J. Working fluids for high-temperature Organic Rankine cycles. Energy 36 (2011) 199-211
- Latorre, F., Cunha, W. P. Evolução da produção e utilização de energia renovável na Acesita Energética. 2006. Seminário: Prática, Logística, Gerenciamento e Estratégias para o Sucesso da Conversão da Matéria Lenhosa em Carvão Vegetal para Uso na Metalurgia e Indústria. Belo Horizonte, MG.
- Lohria, C. R., Rajabub, H. M., Sweeney, D. J., Zurbrügga, C. Char fuel production in developing countries – A review of urban biowaste carbonization. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 59, June 2016, Pages 1514–1530
- Lora, e., & Nascimento, M. (2004). Geração termelétrica. Rio de Janeiro: Interciencia.
- Mackay Green, 2016. Mackay Green Energy Technologies. [ONLINE] Disponível em: <http://mackaygreenenergy.ph/>. [Acessado em 30 de Maio de 2016].
- Maulbetsch, J.S. e M.N. DiFilippo. Cost and Value of Water Use at Combined-Cycle Power Plants, California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research, 2006, CEC-500-2006-034

- McBride B. J., Gordon S. Computer Program for Calculating and Fitting Thermodynamic Functions, NASA RP-1271, 1992.
- Mello P. E. B. de, Monteiro D. B. Thermodynamic study of an EFGT (externally fired gas turbine) cycle with one detailed model for the ceramic heat exchanger. *Energy*, Volume 45, Issue 1, September 2012, Pages 497-502
- Mello, P E B; Monteiro, D B; Thermodynamic study of an EFGT (externally fired gas turbine) cycle with one detailed model for the ceramic heat exchanger. *Energy* 45(2012):497–502
- Mesa, P. J. M.; Rocha, J. D.; Olivares, E.; Barboza, L. A.; Brossard, L. E.; Junior; L. E. B. Pirólise rápida em leito fluidizado: uma opção para transformar biomassa em energia limpa. *Revista Analytica*, n. 04, p. 32-36, 2003.
- Milman O. O., Anan'ev P. A. Dry coolers and air-condensing units (Review). *Thermal Engineering*, March 2016, Volume 63, Issue 3, pp 157–167
- Miranda, R., C., Bailis, R., Vilela, A. O. Cogenerating electricity from charcoaling: A promising new advanced technology. *Energy for Sustainable Development*. Volume 17, Issue 2, April 2013, Pages 171–176
- Monteiro, M. F. Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfosfato simples. 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Moran, M., e Shapiro, H. N. (2004). *Fundamentals of Engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- Mullinger P.; Jenkins B. *Industrial and Process Furnaces: Principles, Design and Operation*. First edition 2008. ISBN: 978-0-7506-8692-1
- Nachenius, R.W.; Ronsse, F.; Venderbosch, R.H.; Prins, W. Biomass Pyrolysis. In Dmitry Yu. Murzin, editor: *Advances in Chemical Engineering*, Vol. 42, Burlington: Academic Press, 2013, pp. 75-139.
- Nemecek, T.; Kagi, T. Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. *Ecoinvent Report No. 15*. Zurich e Dubendorf: 2007.
- Nogueira, L. A. H.; Lora, E. E. S. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 140 p.

- Nowakowski, D.J.; Bridgwater, A.V.; Elliott, D.C.; Meier, D.; Wild, P. Lignin fast pyrolysis: results from an international collaboration. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v.88, p.53-72, 2010. DOI: 10.1016/j.jaap.2010.02.009.
- Nusiaputra Y, Wiemer HJ, Kuhn D. Thermal-Economic modularization of small, organic rankine cycle power plants for mid-enthalpy geothermal fields. *Energies* 2014;7:4221–40.
- Obernberger I, Gerold T. Techno-economic evaluation of selected decentralized CHP applications based on biomass combustion in IEA partner countries: BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH; 2004.
- Obernberger, I., Carlsen, H., & Biedermann, F (2003). State-of-the-art and future developments regarding small scale biomass CHP systems with a special focus on ORC and Stirling engine technologies. International Nordic Bioenergy 2003 Conference.
- Oliveira, A.C. Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal. 2012. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- Oliveira, R. L.ima M. Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2009.
- Olwa, J. Investigation of Thermal Biomass Gasification for Sustainable Small Scale Rural Electricity Generation in Uganda. Licentiate Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management , STOCKHOLM, SWEDEN, 2011.
- Overend, R. P. (2004). Thermochemical Conversion Of Biomass, in Renewable Energy Sources Charged with Energy from the Sun and Originated from Earth-Moon Interaction, [Ed. Evald E. Shpilrain], in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK, [<http://www.eolss.net>]
- Pantaleo A., Camporeale S., Fortunato B. Small scale biomass CHP: techno-economic performance of steam vs gas turbine with bottoming ORC. *Energy Procedia*, 82 (December 2015), pp. 825–832
- Pantaleo, A. Perspectives on the role of bioenergy for distributed heat and power generation. PhD Thesis, Centre for Process Systems Engineering, Chemical Engineering Department, Imperial College London, 2013. pp 295;

- Papadopoulos, A. I., Stijepovic, M., & Linke, p. (2009). On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles. *Applied Thermal Engeneering* Vol.30 , 760 - 769.
- Pennington, D.W.; Potting, J.; Finnveden, G.; Lindeijer, E.; Jolliet, O.; Rydberg, T.; Rebitzer, G. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*. 30, 721–739, 2004.
- Pinheiro Paulo César da Costa. O Gás Natural e sua Utilização em Equipamentos Térmicos. In: II Seminário de Gerenciamento Energético da Indústria Química d Petroquímica, 12-13. Junho 1996, Guarulhos, SP, Anais. São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, Palestra 9, 11p.
- Pinzón, A. M. O.; Cobas, V. R. M. ; Lora, e. E. S. . Dimensionamento ótimo de uma micro rede elétrica isolada com geração fóssil/renovável usando Particle Swarm Optimization. In: XI Latin-American Congress Electricity Generation And Transmission, 2015, Guaratinguetá. Proceedings and book of abstracts of the 11th latin-american congress on electricity generation and transmission - CLAGTEE2015, 2015.
- Prakash, N. and Karunanithi, T. 2009. Advances in Modeling and Simulation of Biomass Pyrolysis. *Asian Journal of Scientific Research*, 2: 1-27.
- Prando, D., Renzi, M., Gasparella, A., Baratieri, M. Monitoring of the energy performance of a district heating CHP plant based on biomass boiler and ORC generator. *Applied Thermal Engineering*, Volume 79, 25 March 2015, Pages 98–107
- Quoilin, S., 2011, Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications, Ph.D. thesis, University of Liege, Liege.
- Quoilin, S., Broekb, M. V. D., Declaye, S., Dewallefa Pi., Lemorta, Vincent. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 22, June 2013, Pages 168–186
- Quoilin, S.; Lemort, V.; Lebrun, J. Experimental study and modeling of an organic Rankine cycle using scroll expander. *Appl. Energy* 2010, 87, 1260–1268
- Ratha, J.; Wolfingera, M.G.; Steinera, G.; Krammera, G.; Barontinib, F.; Cozzanib, V. Heat of wood pyrolysis. *Fuel* Volume 82, Issue 1, January 2003, Pages 81–91
- Reynolds, W. C. Stanjan. Thermochemical Equilibrium Software, version 3.91; Stanford University: Stanford, CA, 1987.

- Ribeiro P.H. Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados (Contribution to the Brazilian database to support the life cycle assessment: nitrogen fertilizers). Tese de Doutorado em Engenharia Química (Ph.D. Thesis in Chemical Engineering). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Polytechnic School of São Paulo University). São Paulo; 2009. 375p.
- Roberts, A.F., A Review of Kinetics Data for the Pyrolysis of Wood and Related Substances. *Combustion and Flame*, 1970. 14: p. 264-272.
- Roebroeks W, and Villa P. 2011. On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe. *proceedings of the National Academy of Sciences Early Edition*: 1-6.
- ROMEIRO, C. D.. Estudo Paramétrico e Diagnóstico Preliminar do Esquema Atual da Usina Termelétrica de Barreiro, Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 2008, 139 p.
- Rowshanzadeh, R., 2011. Performance and cost evaluation of Organic Rankine Cycle at different technologies. Sustainable energy engineering master student. Department Of Energy Technology. KTH, Sweden.
- Rupeshkumar A. V. R., Amitesh P. B., Anjana D. S. Performance Characteristics of an Air-Cooled Condenser Under Ambient Conditions. Institute of Technology, Nirma University, Ahmedabad – 382 481, 08-10 December, 2011
- Saini, A.; Karthik, G.; Garg, P.; Thirumalai, N.; Kumar, P; Srinivasan, V. Thermo-economic analysis of a mixture of RC-318 and pentane as a working fluid in a high temperature ORC. 3rd International Seminar on ORC Power Systems, October 12-14, 2015, Brussels, Belgium
- Saleh, B., G. Koglbauer, M. Wendland and J. Fischer (2007). "Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles." *Energy* 32(7): 1210-1221.
- Santos, S. F. O. M. Produção De Carvão Vegetal em Cilindros Metálicos Verticais: Alguns Aspectos Referentes à Sustentabilidade. Dissertação de Mestrado. Universidade tecnológica federal do Paraná, Campus ponta grossa. Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção – PPGEP. Ponta grossa, Dezembro – 2007
- Schenkel, Y. Modelisation des Flux Massiques et Energetiques dans la Carbonisation du Bois en Four Cornue. Ph.D. Dissertation, Universite' des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgium, 1999.
- Shao, Yingjuan (2011) Development and evaluation of a biomass-fired micro-scale CHP with organic rankine cycle. PhD thesis, University of Nottingham.

Shimaoka, T., Kuba, T., Nakayama, H., Fujita, T., Horii, N. (Eds.). (2016) Basic Studies In Environmental Knowledge, Technology, Evaluation, And Strategy. eBook. Springer

Silva, D. L. A. Avaliação do Ciclo de Vida da Produção do Painel de Madeira MDP no Brasil. 2012. 207 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo. São Carlos.

Silva, G.A.; Ribeiro, P.H.; Kulay, L.A. Avaliação do Desempenho Ambiental dos Fertilizantes Químicos no Brasil. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2006, Santos. Anais. São Paulo, 2006. 12 p.

Sinha, S., Jhalani, A., Ravi, M.R. and Ray, A. (2000), Modelling of pyrolysis in wood: A review, SESI Journal, Vol. 10(1): 41-62

Soltani, R; Dincer, I; Rosen. M. A; Thermodynamic analysis of a novel multigeneration energy system based on heat recovery from a biomass CHP cycle, Appl. Thermal Engineering 89 (2015) pp.90- 100.

Sotomonte, C. A. R. Otimização Multiobjetivo para a Seleção de Fluidos de Trabalho e Parâmetros de Projeto no Ciclo Rankine Orgânico. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Instituto de Engenharia Mecânica (IEM). Itajubá, Junho 2015

Speight, J. G. Chemical and process design handbook. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. 2002. ISBN 0-07-137433-7

Srinivas T., Reddy B. V., Gupta A. V. S. S. K. S. Parametric Simulation of Combined Cycle Power Plant: A Case Study. Int. J. of Thermodynamics Vol. 14 (No. 1), pp. 29-36, 2011

Sugawara, E. T. Comparação dos desempenhos ambientais do B5 etílico de soja e do óleo diesel, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). 2012. 240 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo.

Sunden, B., Shah, Eds. R.K., Ishizuka M., Rudy, T.M., and Wadekar V.V. High Temperature Heat Exchangers (HTHE). Proceedings of Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, Engineering Conferences International, Hoboken, NJ, USA, September 2005. CHE2005 – 29

Sundqvist J. O. Life cycles assessments and solid waste Guidelines for solid waste treatment and disposal in LCA, Final Report. AFR-REPORT 279, Print: Swedish Environmental Protection Agency. ISSN 1102-6944. Stockholm, 1999.

Suuberg, E., Milosavlevic, I., and Lilly, W., “Behavior of Charring Materials in Simulated Fire Environments,” NIST-GCR-94-645, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, June 1994.

Tang, T., Xu, J., Jin, S., Wei, H. Study on Operating Characteristics of Power Plant with Dry and Wet Cooling Systems. *Energy and Power Engineering*, 2013, 5, 651-656

Teixeira M A, Palacio J C E, Sotomonte C R, Lora E E S, Venturini O J, Aßmann D. Assaí – An energy view on an Amazon residue. *Biomass and Bioenergy*, Volume 58, November 2013, Pages 76-86

Teixeira, W. G.; Kern, D. C.; Madari, B. E.; Lima, H. N.; Woods, I. W. (Ed.). *As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: EDUA/Embrapa Amazônia Ocidental, 2010. p. 286-297.

The Guardian. Artigo Notícia. Cave paintings dig deep into our nature. <http://www.theguardian.com/artanddesign/jonathanjonesblog/2011/may/25/cave-paintings-human-nature-art>. Acessado em 20/06/2015

Tingguang Ma, (2015). *Ignitability and Explosibility of Gases and Vapors*. New York. Springer.

Trossero M., Domac J. Development of a sustainable charcoal industry. June 2008, TCP/CRO/3101. North-West Croatia Regional Energy Agency

Turbec, 2016. A new generation is born. [ONLINE] Disponível em: <http://www.turbec.com>. [Acessado em 15 de Julho de 2016].

Turboden, 2016. Organic Rankine Cycle Turbogenerators for clean energy production.. [ONLINE] Disponível em: <http://www.turboden.eu/en/home/index.php>. [Acessado em 23 de Março de 2016].

UNEP (2006). United Nations Energy Programme (UNEP). *Energy Efficiency Guide for Industry in Asia, Thermal Energy Equipment: Furnaces and Refractories*. www.energyefficiencyasia.org. (Acessado em 20/05/2015)

USEPA, 2006. *Life cycle assessment: principles and practice*. Cincinnati: USEPA, 2006.

Veraa D., Juradoa F., Menab B. de, Schoriesb G. Comparison between externally fired gas turbine and gasifier-gas turbine system for the olive oil industry. *Energy* Volume 36, Issue 12, December 2011, Pages 6720–6730

VIANA, M. M. Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girasol. 2008. 223 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Vidal M., Wong W., Rogers W.J., Mannan M.S. Evaluation of lower flammability limits of fuel–air–diluent mixtures using calculated adiabatic flame temperatures. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 130, Issues 1–2, 17 March 2006, Pages 21–27

WBCSD/WRI, 2016, Product Accounting & Reporting Standard. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and the World Resources Institute (WRI). [ONLINE] Disponível em: <http://www.ghgprotocol.org/about-ghgp/about-wri-and-wbcd> [Acessado em 30 de Julho de 2016].

Wright D G, Dey P K, Brammer J. A barrier and techno-economic analysis of small-scale bCHP (biomass combined heat and power) schemes in the UK. *Energy*, Volume 71, 15 July 2014, Pages 332-345

Yang, H., Kudo, S., Kuo, H.-P., Norinaga, K., Mori, A., Mašek, O., Hayashi, J., 2013. Estimation of enthalpy of bio-oil vapor and heat required for pyrolysis of biomass. *Energy Fuels* 27, 2675–2686.

Zelevnik, F.J., Gordon, S., 1968. Calculation of complex chemical equilibria. *Industrial and Engineering Chemistry* 60 (6), 27–57.

Zhang, Y. (2010). Hydrothermal liquefaction to convert biomass into crude oil. In H.P. Blaschek, T.C. Ezeji, J. Scheffran (Eds.), *Biofuels from agricultural wastes and byproducts* (pp. 201-232) Blackwell Publishing

Zhao F. Inert gas Dilution Effect on Flammability Limits of Hydrocarbon Mixtures. Doctoral dissertation. Texas A&M University; 2011

Zhesu, M., e Turan, A. (2010). Finite Time Thermodynamic Modeling of an Indirectly Fired Gas Turbine Cycle. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, (pp. 1 - 4).

Zhu, Q. High-efficiency power generation – review of alternative systems. [ONLINE] IEA Clean Coal Centre, March 2015. Disponível em: https://www.usea.org/sites/default/files/032015_High-efficiency%20power%20generation%20-%20review%20of%20alternative%20systems_ccc247.pdf. (Acesso em: 15 de março de 2016)

Garcia-Perez, M., Lewis, T., Kruger, C.E., 2010. Methods of Producing Biochar and Advanced Biofuels in Washington State. Part 1: Literature Review of Pyrolysis Reactors. First Project Report. Department of Biological Systems Engineering and the Center for

Sustainable Agriculture and Natural Resources, Washington State University, Pullman, WA, 137 pp

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Approved baseline and monitoring methodology AM0041 “Mitigation of methane emissions in the wood carbonization activity for charcoal production”: version 01. 2006. 63 p.

APÊNDICE I

APÊNDICE II

Parâmetros relacionados aos grupos funcionais presente nas moléculas orgânicas no método de Joback e Reid (1987).

	Tb	Hvap	a	b	c	d
Incrementos fora do anel:						
-CH ₃	23,58	2,373	19,5	-0,00808	0,000153	-9,7E-08
-CH ₂ -	22,88	2,226	-0,909	0,095	-5,4E-05	1,19E-08
>CH-	21,74	1,691	-23	0,204	-0,00027	1,2E-07
>C<	18,25	0,636	-66,2	0,427	-0,00064	3,01E-07
=CH ₂ <	18,18	1,724	23,6	-0,0381	0,000172	-1E-07
=CH-	24,96	2,205	-8	0,105	-9,6E-05	3,56E-08
=C<	24,14	2,138	-28,1	0,208	-0,00031	1,46E-07
=C=	26,15	2,661	27,4	-0,0557	0,000101	-5E-08
?CH	9,2	1,155	24,5	-0,0271	0,000111	-6,8E-08
?C-	27,38	3,302	7,87	0,0201	-8,3E-06	1,39E-09
Incrementos no anel:						
-CH ₂ -	27,15	2,398	-6,03	0,0854	-8E-06	-1,8E-08
>CH-	21,78	1,942	-20,5	0,162	-0,00016	6,24E-08
>C<	21,32	0,644	-90,9	0,557	-0,0009	4,69E-07
=CH-	26,73	2,544	-2,14	0,0574	-1,6E-06	-1,6E-08
=C<	31,01	3,059	-8,25	0,101	-0,00014	6,78E-08
Halogenetos:						
-F	-0,03	-0,67	26,5	-0,0913	0,000191	-1E-07
-Cl	38,13	4,532	33,3	-0,0963	0,000187	-1E-07
-Br	66,86	6,582	28,6	-0,0649	0,000136	-7,5E-08
-I	93,84	9,52	32,1	-0,0641	0,000126	-6,9E-08
Incrementos de Oxigênio:						
-OH (alcohol)	92,88	16,826	25,7	-0,0691	0,000177	-9,9E-08
-OH (phenol)	76,34	12,499	-2,81	0,111	-0,00012	4,94E-08
-O- (nonring)	22,42	2,41	25,5	-0,0632	0,000111	-5,5E-08
-O- (ring)	31,22	4,682	12,2	-0,0126	6,03E-05	-3,9E-08
>C=O (nonring)	76,75	8,972	6,45	0,067	-3,6E-05	2,86E-09
>C=O (ring)	94,97	6,645	30,4	-0,0829	0,000236	-1,3E-07
O=CH- (aldehyde)	72,24	9,093	30,9	-0,0336	0,00016	-9,9E-08
-COOH (acid)	169,09	19,537	24,1	0,0427	8,04E-05	-6,9E-08
-COO- (ester)	81,1	9,633	24,5	0,0402	4,02E-05	-4,5E-08
=O	-10,5	5,909	6,82	0,0196	1,27E-05	-1,8E-08
Incrementos de Azoto:						
-NH ₂	73,23	10,788	26,9	-0,0412	0,000164	-9,8E-08
>NH (non-ring)	50,17	6,436	-1,21	0,0762	-4,9E-05	1,05E-08
>NH (ring)	52,82	6,93	11,8	-0,023	0,000107	-6,3E-08
>N-(nonring)	11,74	1,896	-31,1	0,227	-0,00032	1,46E-07
-N= (nonring)	74,6	3,335	n, a,	n, a,	n, a,	n, a,
-N= (ring)	57,55	6,528	8,83	-0,00384	4,35E-05	-2,6E-08
=NH	83,08	12,169	5,69	-0,00412	0,000128	-8,9E-08
-CN	125,66	12,851	36,5	-0,0733	0,000184	-1E-07
-NO ₂	152,54	16,738	25,9	-0,00374	0,000129	-8,9E-08
Incrementos de Sulfuretos:						
-SH	63,56	6,884	35,3	-0,0758	0,000185	-1E-07
-S- (nonring)	68,78	6,817	19,6	-0,00561	4,02E-05	-2,8E-08
-S- (ring)	52,1	5,984	16,7	0,00481	2,77E-05	-2,1E-08

APÊNDICE III

Fluxo de Caixa: ORC:

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CAPEX	R\$ 32.802.268	R\$ 16.009.329	R\$ 15.282.212	R\$ 14.555.095	R\$ 13.827.978	R\$ 13.100.861	R\$ 12.373.744	R\$ 11.646.627	R\$ 10.919.511	R\$ 10.192.394	R\$ 9.465.277	R\$ 8.738.160	R\$ 8.011.043
OPEX	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227
Venda de Eletricidade		R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502
Eletri. Economizada		R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184
Depreciação		R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956	R\$ 5.325.956
Lucro Tributável		R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546	R\$ 21.280.546
IR+CSLL		R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386	R\$ 7.235.386
PIS/PASEP COFINS		R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137
Resultado	-R\$ 32.802.268	-R\$ 722.393	R\$ 4.724	R\$ 731.841	R\$ 1.458.958	R\$ 2.186.075	R\$ 2.913.192	R\$ 3.640.309	R\$ 4.367.426	R\$ 5.094.543	R\$ 5.821.660	R\$ 4.737.951	R\$ 5.465.068

Ano	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CAPEX	R\$ 7.283.926	R\$ 6.556.809	R\$ 5.829.692	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
OPEX	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227	R\$ 3.280.227
Venda de Eletricidade	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502
Eletri. Economizada	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184
Depreciação													
Lucro Tributável	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502	R\$ 26.606.502
IR+CSLL	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211	R\$ 9.046.211
PIS/PASEP COFINS	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137	R\$ 971.137
Resultado	R\$ 6.192.185	R\$ 6.919.302	R\$ 7.646.419	R\$ 13.476.111	R\$ 13.476.111	R\$ 13.476.111	R\$ 13.476.111	R\$ 13.476.111	R\$ 13.476.111	R\$ 13.476.111	R\$ 13.476.111	R\$ 13.476.111	R\$ 13.476.111

Fluxo de Caixa: EFGT:

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CAPEX	R\$ 35.635.000	R\$ 17.391.860	R\$ 16.601.951	R\$ 15.812.041	R\$ 15.022.132	R\$ 14.232.223	R\$ 13.442.314	R\$ 12.652.405	R\$ 11.862.496	R\$ 11.072.586	R\$ 10.282.677	R\$ 9.492.768	R\$ 8.702.859
OPEX		R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500	R\$ 3.563.500
Venda de Eletricidade		R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292	R\$ 21.659.292
Eletri. Economizada		R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184
Depreciação		R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818	R\$ 5.800.818
Lucro Tributável		R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474	R\$ 15.858.474
IR+CSLL		R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881	R\$ 5.391.881
PIS/PASEP COFINS		R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564	R\$ 790.564
Resultado	-R\$ 35.635.000	-R\$ 5.311.329	-R\$ 4.521.420	-R\$ 3.731.511	-R\$ 2.941.602	-R\$ 2.151.692	-R\$ 1.361.783	-R\$ 571.874	R\$ 218.035	R\$ 1.007.944	R\$ 1.797.853	R\$ 615.484	R\$ 1.405.394

[illegible]

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CAPEX	R\$ 38.309.315	R\$ 18.697.074	R\$ 17.847.884	R\$ 16.998.694	R\$ 16.149.504	R\$ 15.300.315	R\$ 14.451.125	R\$ 13.601.935	R\$ 12.752.745	R\$ 11.903.555	R\$ 11.054.366	R\$ 10.205.176	R\$ 9.355.986
OPEX		R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931	R\$ 3.830.931
Venda de Eletricidade	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279
Eletri. Economizada	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184	R\$ 167.184
Depreciação	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212	R\$ 6.106.212
Lucro Tributável	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 20.896.067	R\$ 27.002.279	R\$ 27.002.279
IR+CSLL	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 7.104.663	R\$ 9.180.775	R\$ 9.180.775
PIS/PASEP COFINS	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583	R\$ 985.583
Resultado	-R\$ 38.309.315	-R\$ 3.448.788	-R\$ 2.599.599	-R\$ 1.750.409	-R\$ 901.219	-R\$ 52.029	R\$ 797.161	R\$ 1.646.350	R\$ 2.495.540	R\$ 3.344.730	R\$ 4.193.920	R\$ 2.966.998	R\$ 3.816.187

APÊNDICE IV

Va. Inventário do ciclo de vida consolidado do subsistema florestal.

	Tipo	Quantidade dado bruto	Unidade	Quantidade/m³	
Saídas de Produtos:					
Madeira de Eucalipto, posta na UC	Material - esfera tecnológica	643304	m³/ano	1	m³
Entradas:					
Mudas de Eucalipto	Material - esfera tecnológica	63	kg/ha	1,28E-01	kg/m³
Sulfato de Amônio	Material - esfera tecnológica	31	kg/ha	1,21E-01	kg/m³
Superfósfato Simples	Material - esfera tecnológica	680	kg/ha	2,63E+00	kg/m³
Cloreto de Potássio	Material - esfera tecnológica	211	kg/ha	8,15E-01	kg/m³
Glifosato	Material - esfera tecnológica	4,35	l/ha	2,86E-02	kg/m³
Calcário	Material - esfera tecnológica	1300	kg/ha	5,02E+00	kg/m³
Diesel	Energia - não renovável	62051	kg/ano	9,65E-02	kg/m³
Gás Carbônico	Recursos - natureza	50345	kg/ha .ano	1,26E+03	kg/m³
Emissões para o ar relacionadas a queima de Diesel					
Dióxido de Carbono, fóssil				3,01E-01	kg/m³
Metano				1,24E-05	kg/m³
Óxido Nitroso				1,16E-05	kg/m³
Amônia				1,93E-06	kg/m³
Dióxido de Enxofre				9,74E-05	kg/m³
Benzeno				7,04E-07	kg/m³
Cádmio				9,65E-10	kg/m³
Crômio				4,82E-09	kg/m³
Cobre				1,64E-07	kg/m³
Níquel				6,75E-09	kg/m³
Selênio				9,65E-10	kg/m³
Zinco				9,65E-08	kg/m³
Benzo(a)pireno				2,89E-09	kg/m³
HAP, Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos				3,17E-07	kg/m³
Hidrocarbonetos, sem especificação				2,89E-04	kg/m³
Monóxido de Carbono, fóssil				5,21E-04	kg/m³
Óxidos de Nitrogênio				4,10E-03	kg/m³
Emissões para o ar relacionadas ao uso de fertilizantes					
Óxido Nitroso				2,57E-04	kg/m³
Amônia				2,57E-03	kg/m³
Emissões para a água relacionadas ao uso de fertilizantes e herbicidas					
Nitrato				7,71E-03	kg/m³
Pentóxido de fósforo				4,86E-02	kg/m³
Glifosato				7,99E-05	kg/m³

Vb. Inventário do ciclo de vida consolidado do subsistema UC, Cenário (1), base.

Tipo		Quantidade Dado bruto	Unidade	Quantidade/UF
Saídas de Produtos				
Carvão Vegetal	Material - esfera tecnológica	5,27E+05	mdc/ano	1,00E+00 t
Eletricidade	Energia	0,00E+00	MWh/ano	0,00E+00 MWh/t
Resíduos florestais	Material - esfera tecnológica	1,16E+04	t/ano	9,55E+01 kg/t
Entradas:				
Madeira de Eucalipto	Material - esfera tecnológica	3,70E+01	m³/ha.ano	5,31E+00 m³/t
Diesel	Energia - não renovável	7,29E+03	kg/ano	6,02E-02 kg/t
Água do solo	Recursos - natureza	4,49E+04	m³/ano	3,84E-01 m³/t
Eletricidade	Energia	4,32E+02	MWh/ano	3,57E+00 kWh/t
Emissões para o ar relacionadas a queima de Diesel				
Dioxido de carbono, fóssil				1,88E-01 kg/t
Metano				7,76E-06 kg/t
Óxido nitroso				7,22E-06 kg/t
Amônia				1,20E-06 kg/t
Dióxido de enxofre				6,08E-05 kg/t
Benzeno				4,39E-07 kg/t
Cádmio				6,02E-10 kg/t
Cromo				3,01E-09 kg/t
Cobre				1,02E-07 kg/t
Níquel				4,21E-09 kg/t
Selênio				6,02E-10 kg/t
Zinco				6,02E-08 kg/t
Benzo(a)pireno				1,81E-09 kg/t
HAP, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos				1,98E-07 kg/t
Hidrocarbonetos, não especificados				1,81E-04 kg/t
Monóxido de Carbono, fóssil				3,25E-04 kg/t
Óxidos de nitrogênio				2,56E-03 kg/t
Emissões para o ar - Carbonização, Gases Não Condensáveis				
Ar				9,23E+03 kg/t
Hidrogênio				1,60E+01 kg/t
Dioxido de Carbono, biogênico				1,30E+03 kg/t
Monóxido de Carbono, biogênico				4,21E+02 kg/t
Metano, biogênico				7,67E+01 kg/t

Emissões para o ar - Carbonização, Gases Condensáveis		Quantidade/UF
Metanol		1,82E+01 kg/t
Acetona		1,39E+00 kg/t
Acetato de metila		4,12E+00 kg/t
Acetato de etila		4,64E+00 kg/t
Acido Acetico		8,89E+01 kg/t
Acetol		4,52E+00 kg/t
furaldeido		2,12E+01 kg/t
2 metil 2 ciclopentenona		3,26E+00 kg/t
2-furancarboxaldeido, 5-metil-		8,87E+00 kg/t
fenol		4,81E+00 kg/t
Corylon		5,41E+00 kg/t
m-cresol		3,13E+00 kg/t
p-cresol		6,18E+00 kg/t
2 metoxi fenol (Guaiacol)		9,96E+00 kg/t
3,4-dimetil-fenol		2,37E+00 kg/t
p-Cresol, 2-metoxi-		1,02E+01 kg/t
3-metoxi-1,2-benzenediol		4,25E+00 kg/t
4 etil 2 metoxi fenol		3,32E+00 kg/t
4-metil-1,2-benzenediol		7,98E-01 kg/t
2,6 dimetoxi fenol		1,60E+01 kg/t
1,2,4 trimetoxibenzeno		7,99E+00 kg/t
1,2,3 trimetoxi-5metil-benzeno		4,82E+00 kg/t
Hidrocarbonetos, não especificados		4,02E+01 kg/t
Alcatrão		2,69E+01 kg/t
Água		1,65E+03 kg/t
Emissões para o ar - Queima de Gases		
Dioxido de Carbono, biogênico		0,00E+00 kg/t
Água		0,00E+00 kg/t
Nitrogênio		0,00E+00 kg/t
Oxigênio		0,00E+00 kg/t
COVNM		0,00E+00 kg/t
Material Particulado (PM10)		0,00E+00 kg/t
Óxidos de Nitrgênio		0,00E+00 kg/t

Vc. Inventário do ciclo de vida consolidado do subsistema UC, Cenário 2, com queima de gases.

		Quantidade	Unidade	Quantidade/UF			Quantidade/UF
Tipo		Dado bruto					
Saídas de Produtos					Emissões para o ar - Carbonização, Gases Condensáveis		
Carvão Vegetal	Material - esfera tecnológica	5,27E+05 mdc/ano		1,00E+00 t	Metanol		1,82E+00 kg/t
Eletricidade	Energia	0,00E+00 MWh/ano		0,00E+00 MWh/t	Acetona		1,39E-01 kg/t
Resíduos florestais	Material - esfera tecnológica	1,16E+04 t/ano		9,55E+01 kg/t	Acetato de metila		4,12E-01 kg/t
Entradas:					Acetato de etila		4,64E-01 kg/t
Madeira de Eucalipto	Material - esfera tecnológica	3,70E+01 m³/ha.ano		5,31E+00 m³/t	Acido Acetico		8,89E+00 kg/t
Diesel	Energia - não renovável	7,29E+03 kg/ano		6,02E-02 kg/t	Acetol		4,52E-01 kg/t
Água do solo	Recursos - natureza	4,49E+04 m³/ano		3,84E-01 m³/t	furaldeido		2,12E+00 kg/t
Eletricidade	Energia	4,32E+02 MWh/ano		3,57E+00 kWh/t	2 metil 2 ciclopentenona		3,26E-01 kg/t
Emissões para o ar relacionadas a queima de Diesel					2-furancarboxaldeido, 5-metil-		8,87E-01 kg/t
Dioxido de carbono, fóssil				1,88E-01 kg/t	fênol		4,81E-01 kg/t
Metano				7,76E-06 kg/t	Corylon		5,41E-01 kg/t
Óxido nitroso				7,22E-06 kg/t	m-cresol		3,13E-01 kg/t
Amônia				1,20E-06 kg/t	p-cresol		6,18E-01 kg/t
Dióxido de enxofre				6,08E-05 kg/t	2 metoxi fênol (Guaiacol)		9,96E-01 kg/t
Benzeno				4,39E-07 kg/t	3,4-dimetil-fênol		2,37E-01 kg/t
Cádmio				6,02E-10 kg/t	p-Cresol, 2-metoxi-		1,02E+00 kg/t
Cromo				3,01E-09 kg/t	3-metoxi-1,2-benzenediol		4,25E-01 kg/t
Cobre				1,02E-07 kg/t	4 etil 2 metoxi fênol		3,32E-01 kg/t
Níquel				4,21E-09 kg/t	4-metil-1,2-benzenediol		7,98E-02 kg/t
Selênio				6,02E-10 kg/t	2,6 dimetoxi fênol		1,60E+00 kg/t
Zinco				6,02E-08 kg/t	1,2,4 trimetoxibenzeno		7,99E-01 kg/t
Benzo(a)pireno				1,81E-09 kg/t	1,2,3 trimetoxi-5metil-benzeno		4,82E-01 kg/t
HAP, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos				1,98E-07 kg/t	Hidrocarbonetos, não especificados		4,02E+00 kg/t
Hidrocarbonetos, não especificados				1,81E-04 kg/t	Alcatrão		2,69E+00 kg/t
Monóxido de Carbono, fóssil				3,25E-04 kg/t	Água		1,65E+02 kg/t
Óxidos de nitrogênio				2,56E-03 kg/t	Emissões para o ar - Queima de Gases		
Emissões para o ar - Carbonização, Gases Não Condensáveis					Dioxido de Carbono, biogênico		2,41E+03 kg/t
Ar				9,23E+02 kg/t	Água		1,92E+03 kg/t
Hidrogênio				1,60E+00 kg/t	Nitrogênio		6,37E+03 kg/t
Dioxido de Carbono, biogênico				1,30E+02 kg/t	Oxigênio		9,57E+02 kg/t
Monóxido de Carbono, biogênico				4,21E+01 kg/t	COVNM		8,16E-02 kg/t
Metano, biogênico				7,67E+00 kg/t	Material Particulado (PM ₁₀)		9,90E+00 kg/t
					Óxidos de Nitrgênio		4,47E-01 kg/t

Vd. Inventário do ciclo de vida consolidado do subsistema UC, Cenário 3, com queima de gases e geração de eletricidade.

		Quantidade	Unidade	Quantidade/UF			Quantidade/UF
Tipo		Dado bruto					
Saídas de Produtos					Emissões para o ar - Carbonização, Gases Condensáveis		
Carvão Vegetal	Material - esfera tecnológica	5,27E+05 mdc/ano		1,00E+00 t	Metanol		1,82E+00 kg/t
Eletricidade	Energia	1,19E+05 MWh/ano		9,83E-01 MWh/t	Acetona		1,39E-01 kg/t
Resíduos florestais	Material - esfera tecnológica	1,16E+04 t/ano		9,55E+01 kg/t	Acetato de metila		4,12E-01 kg/t
Entradas:					Acetato de etila		4,64E-01 kg/t
Madeira de Eucalipto	Material - esfera tecnológica	3,70E+01 m³/ha.ano		5,31E+00 m³/t	Acido Acetico		8,89E+00 kg/t
Diesel	Energia - não renovável	7,29E+03 kg/ano		6,02E-02 kg/t	Acetol		4,52E-01 kg/t
Água do solo	Recursos - natureza	4,49E+04 m³/ano		3,84E-01 m³/t	furaldeido		2,12E+00 kg/t
Eletricidade	Energia	4,32E+02 MWh/ano		3,57E+00 kWh/t	2 metil 2 ciclopentenona		3,26E-01 kg/t
Emissões para o ar relacionadas a queima de Diesel					2-furancarboxaldeido, 5-metil-		8,87E-01 kg/t
Dioxido de carbono, fóssil				1,88E-01 kg/t	fênol		4,81E-01 kg/t
Metano				7,76E-06 kg/t	Corylon		5,41E-01 kg/t
Óxido nitroso				7,22E-06 kg/t	m-cresol		3,13E-01 kg/t
Amônia				1,20E-06 kg/t	p-cresol		6,18E-01 kg/t
Dióxido de enxofre				6,08E-05 kg/t	2 metoxi fênol (Guaiacol)		9,96E-01 kg/t
Benzeno				4,39E-07 kg/t	3,4-dimetil-fênol		2,37E-01 kg/t
Cádmio				6,02E-10 kg/t	p-Cresol, 2-metoxi-		1,02E+00 kg/t
Cromo				3,01E-09 kg/t	3-metoxi-1,2-benzenediol		4,25E-01 kg/t
Cobre				1,02E-07 kg/t	4 etil 2 metoxi fênol		3,32E-01 kg/t
Níquel				4,21E-09 kg/t	4-metil-1,2-benzenediol		7,98E-02 kg/t
Selênio				6,02E-10 kg/t	2,6 dimetoxi fênol		1,60E+00 kg/t
Zinco				6,02E-08 kg/t	1,2,4 trimetoxibenzeno		7,99E-01 kg/t
Benzo(a)pireno				1,81E-09 kg/t	1,2,3 trimetoxi-5metil-benzeno		4,82E-01 kg/t
HAP, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos				1,98E-07 kg/t	Hidrocarbonetos, não especificados		4,02E+00 kg/t
Hidrocarbonetos, não especificados				1,81E-04 kg/t	Alcatrão		2,69E+00 kg/t
Monóxido de Carbono, fóssil				3,25E-04 kg/t	Água		1,65E+02 kg/t
Óxidos de nitrogênio				2,56E-03 kg/t	Emissões para o ar - Queima de Gases		
Emissões para o ar - Carbonização, Gases Não Condensáveis					Dioxido de Carbono, biogênico		2,41E+03 kg/t
Ar				9,23E+02 kg/t	Água		1,92E+03 kg/t
Hidrogênio				1,60E+00 kg/t	Nitrogênio		6,37E+03 kg/t
Dioxido de Carbono, biogênico				1,30E+02 kg/t	Oxigênio		9,57E+02 kg/t
Monóxido de Carbono, biogênico				4,21E+01 kg/t	COVNM		8,16E-02 kg/t
Metano, biogênico				7,67E+00 kg/t	Material Particulado (PM ₁₀)		9,90E+00 kg/t
					Óxidos de Nitrogênio		4,47E-01 kg/t

APÊNDICE V

Queima dos GNC:

GNC					Ar _{estequiométrico}			Produtos			
CH ₄	CO	H ₂	CO ₂	+	O ₂	N ₂	→	CO ₂	H ₂ O	N ₂	
69,04	378,57	14,41	44,01		605,98	1995,72		1957,44	283,80	1995,72	kg/t carvão
90% do ar presente nos GNC:			8304	kg							

Queima dos GC:

	Fórmula	Vazão	GC		Ar _{estequiométrico}				Produtos			
	Molecular	kg	C	H	O	+	O ₂	N ₂	→	CO ₂	H ₂ O	N ₂
Ácido Acético	C2H4O2	79,976	31,991	5,369	42,615		85,230	280,550		117,221	47,984	280,550 kg/t carvão
Furaldeído	C5H4O2	19,081	11,926	0,801	6,355		31,773	104,586		43,699	7,155	104,586 kg/t carvão
Metanol	CH4O	16,367	6,135	2,059	8,172		24,517	80,701		22,479	18,404	80,701 kg/t carvão
2,6 dimetoxi fenól	C8H10O3	14,397	8,973	0,941	4,483		26,895	88,530		32,880	8,412	88,530 kg/t carvão
p-cresol, 2-metoxi-	C8H10O2	9,152	6,365	0,668	2,120		20,136	66,282		23,321	5,967	66,282 kg/t carvão
2 metoxi fenól	C7H8O2	8,960	6,068	0,582	2,310		18,477	60,822		22,236	5,201	60,822 kg/t carvão
2-furancarboxaldeído, 5-metil-	C6H6O2	7,985	5,226	0,439	2,320		15,082	49,647		19,148	3,919	49,647 kg/t carvão
1,2,4 trimetoxibenzeno	C9H12O3	7,193	4,623	0,517	2,053		14,368	47,297		16,939	4,623	47,297 kg/t carvão
p-cresol	C7H8O	5,559	4,322	0,415	0,823		13,983	46,028		15,838	3,705	46,028 kg/t carvão
Corylon	C6H8O2	4,868	3,128	0,350	1,389		9,724	32,008		11,463	3,128	32,008 kg/t carvão
1,2,3 trimetoxi-5metil-benzeno	C10H14O3	4,338	2,859	0,336	1,143		9,141	30,089		10,477	3,002	30,089 kg/t carvão
Fenol	C6H6O	4,331	3,316	0,278	0,736		10,308	33,932		12,152	2,487	33,932 kg/t carvão
Acetato de etila	C4H8O2	4,172	2,275	0,382	1,515		7,577	24,940		8,336	3,412	24,940 kg/t carvão
Acetol	C3H6O2	4,064	1,977	0,332	1,755		6,144	20,225		7,243	2,965	20,225 kg/t carvão
3-metoxi- 1,2-benzenediol	C7H8O3	3,828	2,296	0,220	1,311		6,555	21,576		8,414	1,968	21,576 kg/t carvão
Acetato de metila	C3H6O	3,709	1,804	0,303	1,602		5,607	18,456		6,610	2,706	18,456 kg/t carvão
4 etil 2 metoxi fenól	C9H12O2	2,987	2,121	0,237	0,628		6,907	22,737		7,773	2,121	22,737 kg/t carvão
2 metil 2 ciclopentenona	C6H10O	2,933	2,153	0,301	0,478		7,650	25,180		7,891	2,692	25,180 kg/t carvão
m-cresol	C7H8O	2,817	2,190	0,210	0,417		7,085	23,323		8,025	1,877	23,323 kg/t carvão
3,4-dimetil-fenol	C8H10O	2,132	1,677	0,176	0,279		5,583	18,378		6,143	1,572	18,378 kg/t carvão
Acetona	C3H6O	1,247	0,774	0,130	0,344		2,748	9,046		2,835	1,160	9,046 kg/t carvão
4-metil- 1,2-benzenediol	C7H8O2	0,718	0,486	0,047	0,185		1,480	4,872		1,781	0,417	4,872 kg/t carvão
Água	H2O	1486										kg/t carvão

Queima do Alcatrão:

Acatrão					Ar _{estequiométrico}				Produtos			
Vazão	C	H2	O2	N2	H2O	+	O ₂	N ₂	→	CO ₂	H ₂ O	N ₂
26,9	11,20151	1,251335	5,83311	0,09197	5,80891		33,9413	111,724		41,0445	16,9917	111,8165 kg/t carvão