



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS



MURILO HENRIQUE ULIANI

ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO APLICADO A
INDÚSTRIA CAFEEIRA UTILIZANDO A CASCA DO CAFÉ COMO
COMBUSTÍVEL

OURO PRETO - MG
2017

MURILO HENRIQUE ULIANI

murilouliani@gmail.com

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO APLICADO A
INDÚSTRIA CAFEIRA UTILIZANDO A CASCA DO CAFÉ COMO
COMBUSTÍVEL**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: MSc. Leonardo Carvalho Oliveira de Souza

Professor coorientador: DSc. Elisangela Martins Leal

**OURO PRETO – MG
2017**

U39a

Uliani, Murilo Henrique.

Análise energética de um sistema de cogeração aplicado a indústria cafeeira utilizando a casca do café como combustível [manuscrito] / Murilo Henrique Uliani. - 2017.

105f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. MSc. Leonardo Carvalho Oliveira de Souza.

Coorientador: Prof. Dr. Elisangela Martins Leal.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Energia elétrica e calor - Cogeração. 2. Biomassa - Café. 3. Demanda energética. 4. Energias renováveis. I. Souza, Leonardo Carvalho Oliveira de . II. Leal, Elisangela Martins. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos 12 dias do mês de Maio de 2017, às 14h 00min, no auditório da Fundação Gorceix, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno **Murilo Henrique Uliani**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. MSc. Leonardo Carvalho Oliveira de Souza, Prof. DSc. Elisangela Martins Leal, Prof. DSc. Milton Realino de Paula e Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia. O candidato (a) apresentou o trabalho intitulado: **“Análise energética de um sistema de cogeração aplicado a indústria cafeeira utilizando a casca de café como combustível”**, sob orientação do Prof. MSc. Leonardo Carvalho Oliveira de Souza e coorientação da Prof^a. DSc. Elisangela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno aprovado com a nota/conceito 7,1.

Ouro Preto, 12 de Maio de 2017.

Prof. MSc. Leonardo Carvalho Oliveira de Souza
Professor Orientador

Prof.ª DSc. Elisangela Martins Leal
Professora Coorientadora

Prof. DSc. Milton Realino de Paula
Professor Avaliador

Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Professor Avaliador

Murilo Henrique Uliani
Aluno

A Deus dedico mais esta etapa vencida,
meus pais, pelo apoio.

As repúblicas federais e o rock e as
amizades que se realizaram nelas.

AGRADECIMENTO

Agradeço a minha família, minha mãe Angela e meu irmão Bruno, pelo incentivo, ajuda, perseverança, força e auxílio. Meu pai, Neivaldo, exemplo de pessoa em vida e que cultivo no meu caráter.

Ao meu orientado Leonardo e coorientadora Elisangela pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

A vida republicana de Ouro Preto.

Ao rock roll sempre presente em minha caminhada.

Aos eternos irmãos republicanos da república Bastilha, pelos momentos mais insanos que alguém poderia ter na vida e que é para sempre.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

Nos últimos anos, há uma crescente preocupação com o meio ambiente, acompanhado de um amplo desenvolvimento tecnológico com o objetivo de fomentar a exploração das fontes de recursos energéticos renováveis. O Brasil sendo o maior produtor e o segundo maior consumidor de café no mundo, tem uma possível fonte de energia em abundância que são as milhões de toneladas de cascas de grãos de café resultante do seu processamento. O presente trabalho, visa levantar a proposição de um sistema de cogeração que atenda as demandas energéticas do processo produtivo e que utilize a casca de café resultante do processamento como combustível em uma indústria hipotética. Este estudo envolve a busca da configuração, dos parâmetros de processo que melhor se adequam as necessidades da empresa e a análise técnica do sistema de cogeração. A metodologia empregada está de acordo com as características energéticas da empresa hipotética, na qual se utilizou das formulações aplicáveis a partir dos princípios da termodinâmica, principalmente Primeira Lei da Termodinâmica e Segunda Lei da Termodinâmica, e o ciclo Rankine. O sistema de cogeração proposto e analisado foi de uma turbina a vapor de contrapressão, operando em paridade térmica, o qual obteve eficiência máxima de 81,16%, atendendo a toda demanda térmica e 61% da demanda elétrica do processo produtivo e sem excedente de energia elétrica. Para efeito de comparação, outro sistema empregando uma turbina a vapor de extração-condensação também foi analisado. Este cenário, além de suprir toda demanda elétrica (5,34kWe) e térmica (53,38kWt) do processo durante os dias de safra, possui uma produção de energia, de 133,01kWe, que pode ser comercializada durante o tempo de 180 dias na entressafra. A eficiência global no período de entressafra é de 42,68% e de 65,50% no período de safra. A central de cogeração comparativa obteve o valor de eficiência aceitável e atendeu as necessidades energéticas do processo produtivo, que são de vapor e eletricidade, sendo gerado, nesta última, um excedente que poderá ser vendido nos meses de entressafra para a concessionária local.

Palavras-chave: Cogeração; biomassa; café; energias renováveis; demanda energética.

ABSTRACT.

In the last years, there has been a growing concern about the environment, accompanied by a broad technological development with the aim of encouraging the exploitation of sources of renewable energy resources. Brazil being the largest producer and the second largest consumer of coffee in the world, has is a possible source of abundant energy that is millions of tons of grain peels of coffee resulting from its processing. The present work aims to propose a cogeneration system that answer the energy demands of the production process and that uses the coffee's peels resulting from the processing as fuel in a hypothetical industry. This study involves the search of the configuration, the process parameters that best fit the needs of the company and the technical analysis of the cogeneration system. The methodology employed is in accordance with the energetics characteristics of the hypothetical company, in which the formulations applicable from the principles of thermodynamics, mainly First Law of Thermodynamics and Second Law of Thermodynamics, and Rankine cycle were used. The cogeneration system proposed and analyzed was a backpressure steam turbine, operating in thermal parity, which reached a maximum efficiency of 81.16%, met all thermal demand and 61% of the electrical demand of the production process and without surplus electricity. For comparison effect, another system employing an extraction-condensation steam turbine was also analyzed. This scenario, besides supplying all the electrical (5,34kWe) and thermal (53,38kWt) demand of the process during the harvest days, has an energy output of 133,01kWe, which can be commercialized during the time of 180 days in the off season. The global efficiency in the off-season is 42.68% and 65.50% in the harvest period. The comparative cogeneration plant obtained the acceptable efficiency value and met the energy needs of the production process, which are steam and electricity, generating, in this latter, a surplus that can be sold in the off-season months for local concessionaire.

Key-words: *Cogeneration; biomass; coffee; renewable energy; energetic demand.*

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%_{g,s}$	- Consistência ou percentual seco dos grãos após secagem (%)
$\%_{s,g}$	- Consistência ou percentual seco dos grãos (%)
A	- Área (m ²)
CE	- Consumo de energia elétrica (kWh)
C_p	- Calor específico a pressão constante (kJ/kg.K)
E	- Potência eletromecânica consumida no segmento (kWe)
E'	- Potência elétrica gerada pelo sistema de cogeração (kWe)
F	- Força (N)
g	- Aceleração da gravidade (m/s ²)
h	- Entalpia (kJ/kg)
m	- Massa (kg ou ton)
\dot{m}	- Vazão mássica (kg/s ou ton/s)
PCI	- Poder calorífico inferior (kJ/kg)
Q	- Quantidade de Calor (kJ)
\dot{Q}	- Taxa de calor (W)
QS	- Quantidade de sacas na safra (-)
S	- Potência consumida no segmento (kWe)
S'	- Potência térmica gerada pelo sistema de cogeração (kWt)
s	- Entropia (kJ/kg.K)
T	- Temperatura (K ou °C)
t	- Tempo (s)
V	- Velocidade (m/s)
V	- Volume (m ³)
v	- Volume específico (m ³ /kg)

W	- Trabalho mecânico (kJ)
\dot{W}	- Potência (kW)
$\eta_{g,cog}$	- Eficiência global de cogeração (%)
η_{sec}	- Eficiência do secador (%)
$\eta_{Rankine}$	- Eficiência do ciclo Rankine (%)
α	- Razão entre a potência elétrica e a potência térmica consumida no segmento (kWe/kWt)
ρ	- Massa específica (kg/m ³)
ΔT	- Diferença de temperatura entre os dois sistemas considerados (K ou °C)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação da oferta de energia elétrica em 2014 e 2015	8
Figura 2 - Cogeração de energia.....	10
Figura 3 – Geração de energia tradicional.....	13
Figura 4 - Geração de energia no processo de cogeração.....	13
Figura 5 - Sistema operando no regime bottoming.	14
Figura 6 - Sistema operando no regime topping.....	15
Figura 7 - Representação esquemática e diagrama temperatura e entalpia (T – s) para o ciclo Rankine simples	18
Figura 8 - Caldeira flamotubular.	21
Figura 9 - Caldeira aquatubular.	22
Figura 10 - Processo de combustão em grelha inclinada.	23
Figura 11 - Partes principais de uma caldeira aquatubular a biomassa.	24
Figura 12 - Turbinas de ação.....	26
Figura 13 - Turbinas de reação.....	26
Figura 14 - Turbinas de contrapressão e condensação	27
Figura 15 - Configurações de plantas de geração de energia elétrica a vapor.....	29
Figura 16 – Condensador refrigerado à água tipo casco-tubo	30
Figura 17 - Método da convolução.....	35
Figura 18 - Operação de uma central de cogeração fora do ponto de projeto.....	36
Figura 19 - Etapas pré-colheita.....	39
Figura 20 - Etapas pós – colheita.	39
Figura 21- Fluxograma dos materiais e métodos.	60
Figura 22 - Layout do sistema de cogeração proposto empregando turbina de contrapressão..	65
Figura 23 - Caldeira selecionada	68
Figura 24 - Turbina de contrapressão selecionada	69
Figura 25 - Layout do sistema de cogeração comparativo empregando turbina de extração – condensação	73
Figura 26 - Turbina de extração - condensação selecionada.....	76
Figura 27 - Layout de cogeração do cenário entressafra 2 - TEC empregando turbina de extração – condensação	79
Figura 28 - Gráfico resumo das demandas energéticas do sistema de cogeração proposto – TCP.....	82
Figura 29 - Gráfico resumo das demandas energéticas do sistema de cogeração comparativo – TEC	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Objetivos da cogeração tradicional e da cogeração moderna.....	12
Tabela 2 - Razão Calor/potência elétrica e outros parâmetros do sistema de cogeração	32
Tabela 3 - Valores típicos do parâmetro α para os setores industriais	33
Tabela 4- Principais países produtores mundiais de café (por mil sacas de 60kg).	38
Tabela 5 - Estimativas da safra de café de 2016.....	46
Tabela 6 - Produção, consumo e exportação de café (milhões saca de 60kg).....	47
Tabela 7 - Alguns produtos agrícolas e seus resíduos, em 2004.	49
Tabela 8 - Análise imediata da casca de café	52
Tabela 9 - Análise elementar da casca de café	52
Tabela 10 - Variáveis e indicadores	62
Tabela 11 - Parâmetros de caracterização das necessidades da indústria cafeeira	65
Tabela 12 - Dados da colheita de café e a casca de café	67
Tabela 13 - Dados da caldeira	68
Tabela 14 - Dados da turbina de contrapressão	69
Tabela 15 - Caracterização do Cenário Base - TCP	70
Tabela 16 - Caracterização do Cenário 1 - TCP	71
Tabela 17 - Caracterização do Cenário 2 - TCP	71
Tabela 18 - Fluxo energético e mássico do sistema de cogeração proposto	72
Tabela 19 - Dados da turbina de extração - condensação.....	75
Tabela 20 - Caracterização do Cenário base - TEC.....	77
Tabela 21 - Caracterização do Cenário 1 – TEC	78
Tabela 22 -Caracterização do Cenário 2 Entressafra - TEC.....	80
Tabela 23 - Fluxo energético e mássico do sistema de cogeração comparativo	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do problema	1
1.2	Justificativa	4
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Geral.....	5
1.3.2	Específicos	5
1.4	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	O setor energético brasileiro	7
2.2	Cogeração	9
2.2.1	Definição de cogeração e aspectos gerais	9
2.2.2	Tecnologias Aplicadas	14
2.2.2.1	Equações termodinâmicas	15
2.2.2.2	Ciclo Rankine	18
2.2.2.3	Caldeiras.....	20
2.2.2.4	Turbina a vapor	25
2.2.2.5	Sistema de condensação	29
2.2.3	Análise de sistemas de cogeração	31
2.2.3.1	Análise com o método α	31
2.2.3.2	Análise usando valores instantâneos ou curvas de duração	35
2.2.3.3	Operação fora do ponto de projeto (off-design).....	35
2.3	Indústria Cafeeira.....	37
2.3.1	Café no Brasil.....	37
2.3.2	Processo de produção	38
2.3.3	Aspectos gerais de equipamentos.....	41
2.3.3.1	Lavador.....	41
2.3.3.2	Despolpadores	42
2.3.3.3	Secadores.....	42
2.3.3.4	Beneficiadora	44
2.3.4	Projeções futuras do mercado cafeeiro.....	46
2.4	Casca de café	48
2.4.1	A biomassa	48
2.4.1.1	Fatores críticos para a biomassa	50
2.4.2	Caracterização da casca de café para geração de energia.....	51
2.4.2.1	Composição química imediata	51
2.4.2.2	Composição química elementar	52

2.4.2.3	Umidade	53
2.4.2.4	Densidade relativa	53
2.4.2.5	Poder calorífico	53
2.4.2.6	Teor das cinzas	54
2.4.3	Formas de obtenção de energia a partir da biomassa agroindustrial	56
2.4.3.1	Combustão.....	56
2.4.3.2	Pirólise.....	57
2.4.3.3	Gaseificação	58
3	METODOLOGIA.....	59
3.1	Tipo de pesquisa	59
3.2	Materiais e métodos	60
3.3	Variáveis e indicadores	61
3.4	Instrumento de coleta de dados.....	62
3.5	Tabulação dos dados	62
3.6	Considerações finais do capítulo	63
4	RESULTADOS.....	64
4.1	Caracterização do empreendimento.....	64
4.2	Sistema de cogeração proposto.....	65
4.2.1	Os equipamentos selecionados e os cenários envolvidos no sistema de cogeração	66
4.2.2	Resumo da análise energética do sistema de cogeração proposto.....	70
4.3	Comparação com outro sistema de cogeração	73
4.3.1	Os equipamentos selecionados e os cenários envolvidos no sistema de cogeração	74
4.3.2	Resumo da análise energética do sistema de cogeração comparativo.....	76
4.4	Considerações finais	82
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	84
5.1	Conclusões.....	84
5.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do problema

Ainda que o clima da Terra sempre tenha sofrido mudanças naturais, agora, pela primeira vez, a atividade humana é a principal força que afeta este processo, com consequências potencialmente drásticas (BENITO, 2013).

Todos os dias usa-se enormes volumes de combustíveis fósseis na forma de gasolina, petróleo, carvão e gás natural, liberando dióxido de carbono. Isto, junto a outras emissões geradas pela atividade humana, como o metano e o óxido nitroso, acentuam o “efeito estufa” natural que torna a Terra um planeta habitável (BENITO, 2013).

Esta velocidade de alterações sem precedentes está ameaçando os sistemas sociais e ambientais, que não podem ajustar-se ao mesmo ritmo. No mundo, aumenta-se a ocorrência de eventos meteorológicos cada vez mais extremos, as vezes com manifestações inesperadas (ABREU, 2001).

A importância do tema ambiental também é um ponto central na questão energética. A partir da crise do petróleo da década de setenta e das principais conferências sobre meio ambiente, como a de 1972 realizada em Estocolmo, a de 1992 no Brasil e a de Quioto, realizada em 1997, iniciou-se uma mudança de comportamento em relação ao consumo e utilização da energia. Tal processo de mudança levou à busca do desenvolvimento de critérios para substituir principalmente o petróleo e as outras fontes de energia fósseis e a promover o uso das energias alternativas renováveis e a eficiência energética (ABREU, 2001).

Em decorrência da crise energética em 2001, e a recente e pior crise energética da história, em 2015, devido a redução de água em reservatórios das hidrelétricas por escassez de chuvas e do aumento do consumo de energia acima da capacidade das companhias em responder ao crescimento dessa demanda, levou o Brasil a um panorama de incertezas quanto à garantia de oferta de energia (JUNIOR, 2009).

Durante esses períodos de crise a alternativa abordada pelo governo foi a utilização da produção total das termoelétricas na geração de energia. Segundo Reis (2011) como são usados combustíveis fósseis para queimar e gerar energia, há uma grande liberação de poluentes na atmosfera. Estes poluentes são responsáveis pela geração do efeito estufa e do aquecimento global. Portanto, este tipo de energia é altamente prejudicial ao meio ambiente. Outra

desvantagem é que o custo final deste tipo energia é mais elevado do que a gerada em hidrelétricas, em função do preço dos combustíveis fósseis.

Uma das alternativas para suprir o déficit de eletricidade é o estímulo à geração independente e descentralizada e a participação de capital privado no sistema. Nesse quesito, tornam-se importantes as energias renováveis, cujos recursos podem ser implantados em qualquer lugar do mundo, não havendo uma centralização de recursos, como acontece com o petróleo, por exemplo, e são fontes de energia que nunca se esgotam, pois estão em constante regeneração (JUNIOR, 2009).

Analisando as tecnologias das fontes energéticas alternativas renováveis, já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa, utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica, possui a flexibilidade de suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

A biomassa tem origem em resíduos sólidos urbanos — animais, vegetais, industriais e florestais — e, voltada para fins energéticos, abrange a utilização desses vários resíduos para a geração de fontes alternativas de energia. Apresentam-se diferentes tecnologias para o processamento e transformação de energia, mas todas as tecnologias de biomassa atualmente usadas no mundo possuem dois problemas cruciais: o custo da biomassa e a eficiência energética de sua cadeia produtiva (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

Diante das crises internacionais de abastecimento e preços elevados do petróleo na década de 1970, foi necessário o incentivo à busca por formas de redução da demanda energética. Marcou-se, também, pela ideia de implementação de uma mentalidade racionalista propondo, assim, a minimização do desperdício energético (BALESTIERI, 2002).

Esse cenário foi fator decisivo para impulsionar novos estudos que culminaram no desenvolvimento e na aplicação de sistemas de cogeração. Vale ressaltar que, de acordo com dados históricos, a técnica da cogeração teve início em meados de 1870. Contudo, desde seu início até o presente, a mesma tem passado por épocas de auge e também de esquecimento, as primeiras associadas principalmente às crises do petróleo em 1973/74 e 1979/80, e as segunda à manutenção dos preços baixos dos energéticos, como aconteceu depois da segunda grande guerra (BASTOS, 2011).

Em termos de classificação geral, a cogeração consiste na produção simultânea de duas formas de energia útil, como por exemplo, energia elétrica e térmica, a partir de uma única fonte

de energia e que tem por objetivo suprir as demandas de uma unidade de processo. Esse sistema torna-se atraente devido à capacidade de aproveitamento da energia contida na fonte, proporcionando o aumento da eficiência do sistema termodinâmico como um todo (BALESTIERI, 2002).

Uma das biomassas de grande destaque no Brasil é o café. Responsável por cerca de um terço da produção mundial, faz o país ser o maior produtor atualmente (SOUZA, 2013). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), estimada safra de 2016 a produção brasileira deverá ficar entre 49,13 e 51,94 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado. Se considerada a média de produção desse intervalo (50,5 milhões de sacas), esta pode ser a segunda maior safra de café da história, ficando atrás da safra de 2012, que foi de 50,8 milhões de sacas. A previsão indica um acréscimo de 13,6% a 20,1% em relação à safra de 2015 que foi de 43,24 milhões de sacas produzidas no país.

Na indústria cafeeira, a secagem é o processo mais econômico para manutenção da qualidade de produtos agrícolas durante a armazenagem em ambiente natural. Consiste na remoção da umidade que os grãos apresentam após o amadurecimento a um valor máximo com o qual o produto pode ser armazenado durante períodos predeterminados, à temperatura ambiente, sem que ocorra sua deterioração ou redução da qualidade. Uma alternativa viável para utilização dos resíduos de biomassa é a instalação de um sistema constituído por uma fornalha equipada com caldeira associada a um ou mais trocadores de calor. Nesse processo, o vapor fornecido pela caldeira injeta ar aquecido na massa de grãos e propiciam sua secagem (SILVA et al, 2000).

Com esse crescente mercado de cultivo do café, milhões de toneladas de cascas de grãos são produzidas no Brasil todo ano. Esse subproduto normalmente vai para o lixo ou é usado para a forração dos terrenos dos cafezais, restituindo parte dos fertilizantes retirados pela planta. Mas a casca do café tem um potencial energético que pode, em alguns casos, torná-la substituta da lenha, sendo uma opção mais barata e ecologicamente correta para empresas que usam a madeira na geração de energia (VALE, 2007).

A casca do café, assim como outras biomassas, pode gerar eletricidade em termoelétricas, a partir da combustão em fornalhas, gerando energia na forma de calor, utilizado para a produção de vapor, que por sua vez é utilizado para a produção de energia elétrica e, em cogeração, em outras energias tais como a mecânica (VALE, 2007).

Diante desse cenário, surge a seguinte pergunta:

Utilizando a casca de café como combustível, qual a configuração e os parâmetros de um sistema de cogeração que melhor se adapta na indústria cafeeira em estudo?

1.2 Justificativa

Nos últimos anos há uma crescente preocupação com o meio ambiente, acompanhado de um amplo desenvolvimento tecnológico com o objetivo de fomentar a exploração das fontes de recursos energéticos renováveis. Isto é resultado da grande preocupação social pelo meio em que se vive, tanto no âmbito governamental, quanto empresarial, já que se começou a desenvolver uma série de ações destinadas a proteger o planeta (BENITO, 2013).

Com o crescimento da economia, o consumo de energia elétrica aumentou de forma significativa nos últimos anos, ocorrendo crises de abastecimento devido ao aumento da demanda em relação a oferta. A eletricidade se tornou uma das fontes mais versáteis e convenientes de energia, passando a ser recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento dos países (PINTO, 2008).

Os problemas energéticos podem ser amenizados com a utilização da cogeração. A cogeração oferece uma opção descentralizada para o setor industrial, reduzindo os investimentos públicos em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, além de ser uma opção em curto prazo para a expansão do setor privado e redução do risco de falhas em sistemas com baixas reservas marginais (CARVALHO, 2004).

A expectativa de maior participação da biomassa no suprimento de energia no futuro pode ser explicada por vários motivos. Primeiramente, os combustíveis obtidos a partir da biomassa podem substituir mais ou menos diretamente os combustíveis fósseis na atual infraestrutura de suprimentos de energia. Em segundo lugar, os recursos em potencial são abundantes, uma vez que há disponibilidade de terras. As terras não destinadas a plantação de alimentos e os produtos agrícolas continuam a crescer mais do que a taxa de crescimento demográfico. Em terceiro lugar, nos países em desenvolvimento, a demanda por energia está crescendo rapidamente devido ao crescimento da população, a urbanização e a melhoria de padrões de vida. Enquanto ocorrem algumas substituições de combustíveis nesse processo, a demanda total de biomassa também tende a crescer (CALLE, BAJAY e ROTHMAN , 2008).

Quando usada como combustível, a casca do café, assim como outros resíduos agroflorestais, tem inúmeras vantagens em relação aos combustíveis fósseis. Em primeiro lugar,

é um combustível renovável, e os compostos liberados na sua combustão são sequestrados pelos novos plantios, fechando o ciclo do carbono, e, portanto, não contribuindo com o efeito estufa. Outra vantagem é a possibilidade de agregar valor a um resíduo que geralmente é descartado e, com isso, gerar emprego, renda e desenvolvimento social nas regiões onde a cultura do café é uma prática (VALE, 2007).

Espera-se que os dados obtidos a partir desse estudo possam ser utilizados para melhorar a gestão dos resíduos provenientes do café e que isso possa abrir a possibilidade de uso na produção de energia em pequenas comunidades rurais e nas agroindústrias, a partir da combustão e utilização de sua energia térmica e elétrica no processo de cogeração.

Como o Brasil se destaca no cenário mundial como um dos maiores produtores de café e, conseqüentemente, dos resíduos de café, a ligação desse com a produção de energia dessa biomassa parece bem promissora e justifica-se a adoção desse estudo. Assim, conforme apresentado na seção 1.1, requer uma análise da configuração de cogeração que melhor se encaixa utilizando a casca de café com fonte de combustível.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Este trabalho tem por objetivo principal estudar um sistema de cogeração aplicado a uma indústria cafeeira utilizando a casca de café como combustível. Este estudo envolve a busca da configuração, dos parâmetros de processo que melhor se adequam as necessidades da empresa e a análise técnica do sistema de cogeração proposto.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre: biomassa, ciclo do café (processos e equipamentos utilizados) e cogeração;
- Levantar o potencial energético da casca de café para cálculo posterior;
- Identificar os parâmetros de caracterização de um processo específico da indústria cafeeira em estudo: razão entre calor e potência elétrica, eficiência termodinâmica e consumo específico de vapor, combustível e calor;
- Fazer estudos de casos utilizando os processos de cogeração;
- Analisar, detalhar e fundamentar o sistema de cogeração proposto;
- Propor recomendações para trabalhos futuros.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos e apresenta-se conforme a estrutura a seguir:

No primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias do tema abordado.

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para coleta de dados que são partes essenciais na obtenção dos resultados. Neste capítulo também será apresentada as melhorias adotadas.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados a partir da coleta de dados da condição inicial, e os resultados depois de aplicada as melhorias.

Conclusões e recomendações serão discutidos no quinto capítulo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica sobre o tema abordado. Desta forma, foram abordados os conceitos sobre biomassa, ciclo do café (processos e equipamentos utilizados), cogeração e cogeração e biomassa.

2.1 O setor energético brasileiro

De acordo com Tolmasquim (2016), o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) possui características singulares que norteiam as decisões da operação e do planejamento. Merecem destaque:

- Dimensões continentais;
- Predominância de geração hidrelétrica com grande participação de usinas com capacidade de regularização;
- Diversidade hidrológica das bacias hidrográficas permitindo uma complementariedade entre as regiões;
- Interligação plena entre as regiões a partir de um extenso sistema de linhas de transmissão de longa distância;
- Participação de diversos agentes com usinas no mesmo rio, bem como linhas de transmissão operadas por agentes distintos;
- Tempo de maturação e construção das grandes obras de geração e transmissão de energia.

O país é atendido a partir da rede interligada denominada de Sistema Interligado Nacional (SIN), atualmente o SIN é composto de quatro subsistemas designados Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte, que compreendem os centros de carga destas regiões (TOLMASQUIM, 2016).

A matriz energética brasileira é caracterizada predominantemente como de origem renovável, destacando-se a geração hidráulica que, no balanço de 2015, representou 64% da capacidade instalada do sistema elétrico (EPE, 2016). A distribuição desta capacidade instalada, por tipo de fonte, é apresentada na Figura 1.

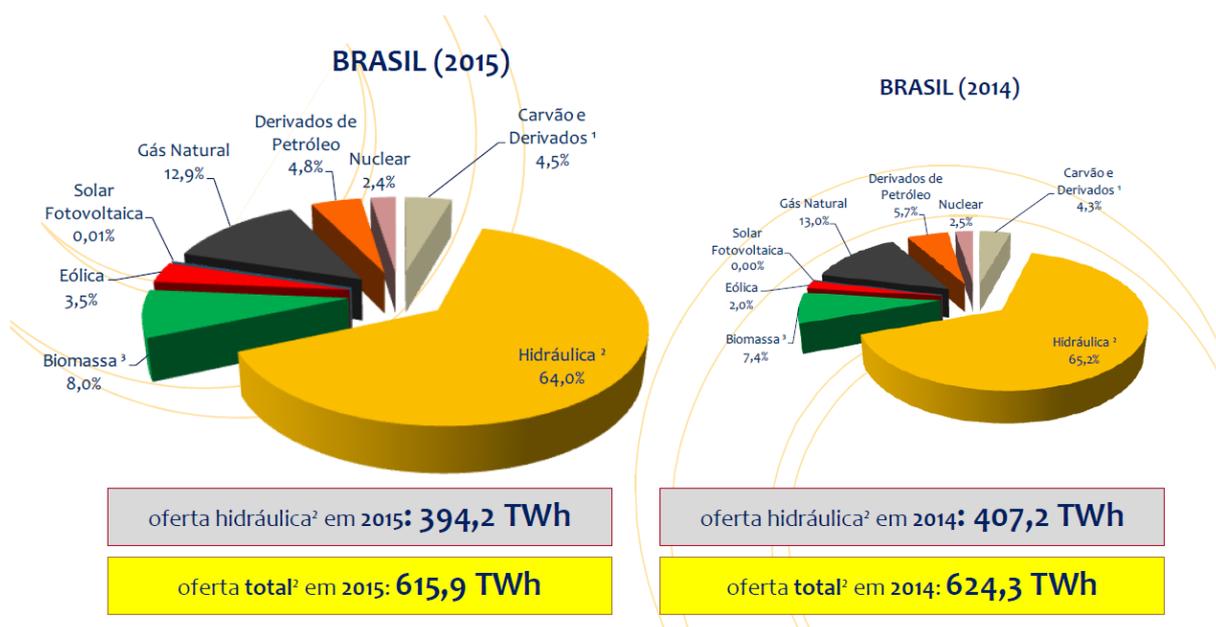


Figura 1 - Comparação da oferta de energia elétrica em 2014 e 2015

Fonte : EPE, 2016

Apesar da participação de hidrelétricas na capacidade instalada ser mais que a metade do total gerado, a sua oferta vem caindo com os anos. Isso é devido ao aumento da participação de outros tipos de energias renováveis, como a biomassa, eólica e solar fotovoltaica, e devido à atuação dos órgãos ambientais e às mais diversas entidades da sociedade civil, alegando alto impacto ambiental com estas usinas (TOLMASQUIM, 2016).

A estrutura energética do Brasil ainda se caracteriza como não autossuficiente. O petróleo, o carvão e o gás natural são os principais produtos de importação do país. Apesar desta condição, atualmente, o Brasil possui baixa dependência externa, devido aos investimentos recentes para aumentar a produção e suprir a necessidade interna, principalmente quando se refere ao petróleo, destacando-se a descoberta do Pré-Sal. Ressalta-se que o setor energético afeta os demais setores da economia sendo de extrema importância um planejamento adequado que garanta o desenvolvimento e a segurança energética do país (DARWICHE, 2010)

Em 2001, principalmente em função da falta de investimento nas décadas anteriores em geração e transmissão, houve o popularmente chamado “apagão” com restrição de consumo de energia elétrica. O governo federal elaborou um Plano Prioritário de Termelétricidade (PPT) com a implantação de termelétricas a gás natural, com o gás natural proveniente da Bolívia. Entretanto, ocorreu uma rápida mudança nesta área, pois já em 2008 havia uma limitação de fornecimento deste combustível devido à alta demanda e às limitações de produção e transporte.

Neste cenário de limitação das alternativas de geração de hidreletricidade e termelétricas a gás natural, a ANEEL tem tomado ações para incentivar a implantação de combustíveis renováveis (RODRIGUES, 2009).

Além da eletricidade, busca-se uma matriz energética “limpa” com o aumento da participação dos combustíveis renováveis. Todas estas alternativas se mostraram atrativas, porém sua implantação não garante a capacidade necessária para o atendimento do crescimento da demanda necessária. Além disto, o crescimento do país nos últimos anos contribuiu para o cenário atual de déficit de oferta de geração (RODRIGUES, 2009).

A busca por uma energia mais limpa, as ameaças de déficit, os riscos de interrupção do fornecimento e as elevações das tarifas de energia elétrica fizeram com que empresas investissem em autogeração, alternativas de reaproveitamento e, conseqüentemente, racionalização de energia. Impulsionou, assim, o estudo de aplicabilidade das diferentes formas de cogeração no processo produtivo, para garantir a produção e a qualidade de seus produtos.

2.2 Cogeração

Dada à importância deste tema, a seguir serão apresentados alguns aspectos referentes à definição, ao histórico e aos ciclos de cogeração, bem como a sua aplicação no setor sucroalcooleiro e os programas governamentais de incentivo.

2.2.1 Definição de cogeração e aspectos gerais

De acordo com Walter (1994), cogeração é um vocábulo de origem norte-americana empregado desde a década de 70 para designar os processos de produção combinada de calor útil (vapor, água quente, água gelada, ar quente e frio) e potência (elétrica ou mecânica), com uso sequencial da energia liberada a partir da queima de uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico empregado (Rankine, Brayton ou Combinado). Em outras palavras, seria o aproveitamento de uma parcela de energia que teria de ser obrigatoriamente rejeitada prevista pela Segunda Lei da Termodinâmica, resultando em um aumento da eficiência global do ciclo (BALESTIERI, 2002). A Figura 2 mostra de forma esquemática esse entendimento.

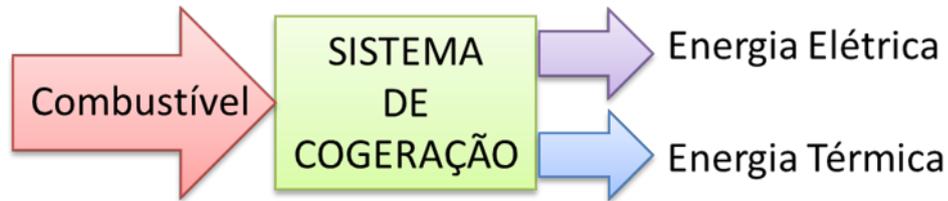


Figura 2 - Cogeração de energia

Fonte: Brasil, 2005

A cogeração é um método efetivo de conservação de energia primária (energia de um combustível) que pode ser aplicado ao setor industrial (açúcar e álcool, papel e celulose, químicas, petroquímicas, etc...) ou ao setor terciário (hospitais, hotéis, shopping centers, restaurantes, aeroportos, etc...), quando economicamente justificado.

De acordo com Balestieri (2002), pode-se destacar vantagens de utilização da cogeração, a saber:

- Elevação da eficiência conjunta de conversão da energia química do combustível em energia útil para patamares de até 85% (35% para energia elétrica e 50% para energia térmica, havendo variação de acordo com o ciclo térmico adotado);
- Possibilidade de uso de combustíveis renováveis ou resíduos em substituição aos combustíveis fósseis, apresentando menores índices de emissão de poluentes;
- Maior confiabilidade na utilização dos insumos energéticos para a empresa autoprodutora, sendo que a mesma somente produz energia para o seu uso exclusivo (BRASIL, 1996); especialmente em setores cujos processos não permitem falhas no fornecimento de energia;
- Facilidade de apropriação da tecnologia pelo quadro técnico das empresas;
- Possibilidade de geração de recursos para a empresa, mediante a interconexão da central de cogeração ao sistema elétrico da concessionária local, desde que as tarifas de compra e venda de energia elétrica se encontrem em patamares que remunerem o capital investido.

Para Lora e Nascimento (2004) a cogeração independe dos seguintes pontos:

- A forma com que as energias estão disponíveis: a potência pode ser necessária tanto na forma elétrica como na forma mecânica, e a energia térmica pode ser utilizada em sistemas de aquecimento e refrigeração;

- A eletricidade pode ser utilizada pela própria empresa que possui a instalação de cogeração, como pode ser vendida para outros consumidores ou para uma concessionária de serviço elétrico;
- A central de cogeração pode ser de propriedade de um consumidor, de um produtor independente, sendo este uma pessoa jurídica ou empresas que comercializam toda ou parte da energia produzida (BRASIL, 1996) ou de uma concessionária;
- O porte dos sistemas pode ser de apenas alguns quilowatts, até unidades de muitos megawatts de capacidade com grande flexibilidade para adaptar a necessidade do processo (LORA e NASCIMENTO, 2004).

As importantes modificações na disponibilidade e nos custos da energia, que tiveram início a partir de 1973, com o primeiro choque do petróleo, resultaram no incentivo à racionalização do uso da energia e dos combustíveis nobres e nas desregulações do setor elétrico de alguns países ao longo das últimas três décadas, reestabelecendo a importância da tecnologia de cogeração. Nos Estados Unidos, a publicação do PURPA (Public Utilities Regulatory Policy Act), em 1978, abriu novos horizontes na indústria de geração, na medida em que introduziu a noção de competição em mercado aberto de energia elétrica e rompeu a estrutura verticalmente integrada das concessionárias públicas (LORA e NASCIMENTO, 2004).

A cogeração a partir das décadas de 1980 e 1990, devido ao aumento dos preços dos combustíveis, passou a ser reconhecida como uma alternativa energética. Para que esta tecnologia avançasse houveram diversas contribuições (LORA e NASCIMENTO, 2004):

- Maior disponibilidade de gás natural nos países industrializados;
- O desenvolvimento tecnológico das turbinas e motores a gás;
- Perda de interesse pela energia nuclear (altos custos de construção e pressões dos ambientalistas devido aos acidentes ocorridos);
- Necessidade de processos de conversão energética sustentáveis, com menores emissões de dióxido de carbono (CO₂), para mitigar os impactos do efeito estufa, da destruição da camada de ozônio, da chuva ácida e da poluição nas grandes cidades;
- Nos Estados Unidos, houve a implantação de uma legislação que incentivou muito a cogeração. A PURPA (Power Utilities Regulatory Policies Act)

estipulava uma qualificação prévia e a remuneração pelo custo evitado. (LORA; NASCIMENTO, 2004).

Em todos os países do mundo os sistemas de cogeração atuais têm algumas de suas características básicas diferenciadas quando comparadas com os sistemas tradicionais (IEA, 2008). Dessa forma, pode-se dividir a cogeração em duas eras: A Cogeração Tradicional e a Cogeração Moderna que apresentam características específicas e seguem as tendências e exigências do mercado, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Objetivos da cogeração tradicional e da cogeração moderna

	Cogeração Tradicional	Cogeração Moderna
Motivação básica	Autossuficiência de energia elétrica	Venda de excedentes e redução de emissões
Equipamento de geração predominante	Turbinas a vapor	Turbinas a gás e ciclos combinados
Combustíveis	Residuais (bagaço, cascas, etc)	Todos
Relação com a concessionária	Operação independente	Operação interligada

Fonte: adaptado de Santos e Novo, 2008

Para compreensão do rendimento de uma planta de cogeração, primeiramente descreve-se como funciona um sistema convencional de geração de energia (INEE, 2014). Nestes sistemas, pode-se fazer tanto a queima de combustíveis fósseis, como por exemplo, carvão mineral, óleo diesel ou gás natural, como também a queima de combustíveis alternativos como biomassa e combustíveis sólidos e líquidos, estes muitas vezes oriundos do próprio processo industrial do usuário da cogeração. A operação de um sistema convencional de geração de energia se baseia na queima do combustível para a produção de vapor. Este vapor, em alta pressão, é utilizado para acionar turbinas que geram energia elétrica. Por maior que seja a eficiência do sistema convencional, a maior parcela da energia contida no combustível é transformada em calor e perdida para o meio ambiente. Na Figura 3 observa-se como a energia disponibilizada pelo combustível utilizado é subdividida após o funcionamento de um gerador termelétrico (BRASIL, 2005).

Gerador Termelétrico

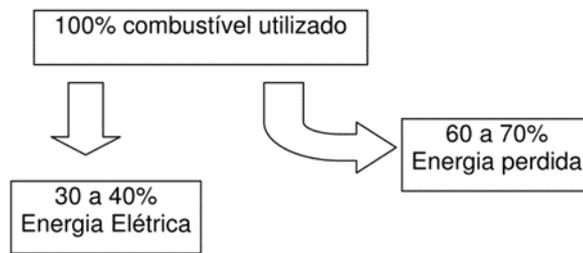


Figura 3 – Geração de energia tradicional

Fonte: INEE, 2014

Já num sistema de cogeração, o calor excedente referido que seria perdido da queima do combustível é utilizado para gerar vapor em pressões mais baixas, aumentando assim a eficiência do processo em até três vezes. Na Figura 4 observa-se que, com o uso da cogeração, o esquema de geração se modifica, sendo bem menor a energia perdida no processo de conversão. Muitas indústrias e prédios comerciais necessitam de calor, na forma de vapor, para seus processos de trabalho (esterilização de equipamentos médicos ou uso do CO₂ resultante da combustão, por exemplo), produção de água gelada em sistemas de ar condicionado central, produção de água quente, etc. A vantagem dessa solução é que o consumidor economiza o combustível que necessitaria queimar para produzir o calor necessário aos processos de aquecimento ou resfriamento de água (BRASIL, 2005).

Gerador com Cogeração

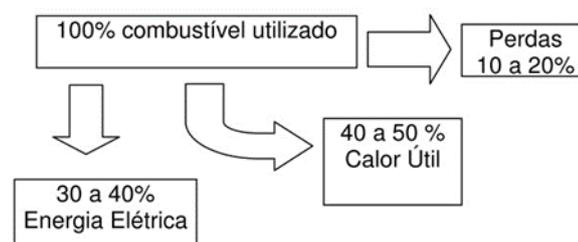


Figura 4 - Geração de energia no processo de cogeração

Fonte: INEE, 2014

A descentralização da geração através dos sistemas de cogeração é uma de suas características fundamentais, já que a energia térmica produzida neste processo deve ser aproveitada em um local próximo da sua geração. Esta proximidade deve-se ao fato de tanto a água quente como o vapor não poderem ser transportados a longas distâncias, sem que suas perdas sejam significativas e inviabilizem a sua utilização. A cogeração protege o seu usuário contra falhas e restrições no fornecimento, não dependendo então das concessionárias (INEE,

2014). Um sistema de cogeração bem instalado é um investimento vantajoso. Quando bem aplicado, reduz os custos de energia de 30% a 80% (SANTOS e NOVO, 2008).

Já no Brasil, a cogeração começou a ser priorizada apenas na década de 80 visando à minimização dos impactos ambientais provocados por outras fontes.

Nos últimos anos o setor elétrico brasileiro sofreu mudanças estruturais inovadoras de ordem institucional e em nível de regulamentação que alteraram sensivelmente o panorama, até então estável e controlado pelo governo, para um ambiente competitivo.

A cogeração no Brasil está concentrada aos seguintes setores industriais: papel e celulose, sucroalcooleiro, siderurgia e petroquímica. Estes segmentos possuem resíduos de seus processos que são utilizados como combustíveis em caldeiras, com a cogeração de energia e calor (LORA e NASCIMENTO, 2004).

O estímulo à geração independente e descentralizada, além do aumento da geração de energia elétrica através da cogeração em indústrias, tem sido crescente.

2.2.2 Tecnologias Aplicadas

A cogeração necessita de equipamentos que queimem o combustível e permitam aproveitar a energia térmica despendida na combustão. Normalmente são necessários acionadores primários que produzam trabalho. Para se queimar biomassas são utilizadas as caldeiras, cujo vapor gerado aciona turbinas. Esta tecnologia é convencionalmente chamada de ciclo a vapor. Existem dois arranjos básicos de cogeração: ciclo inferior (Bottoming) (Figura 5) e ciclo superior (Topping) (Figura 6).

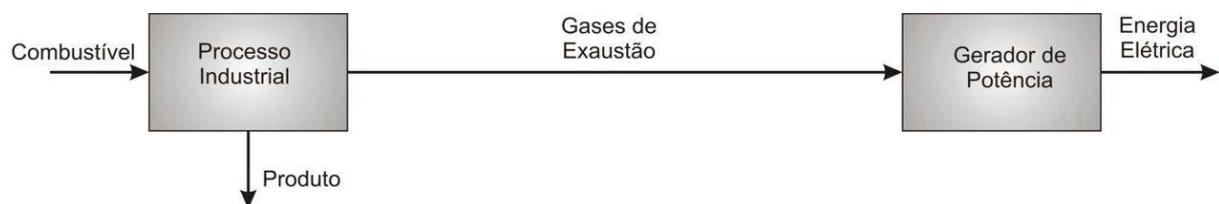


Figura 5 - Sistema operando no regime bottoming.

Fonte: VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995



Figura 6 - Sistema operando no regime topping.

Fonte: VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995

No ciclo superior, inicialmente o combustível é processado, o acionador primário produz a energia elétrica, sendo o vapor fornecido ao processo industrial. No Ciclo inferior, o vapor é conduzido inicialmente para o processo industrial e o calor rejeitado utilizado para a geração de energia elétrica.

Os ciclos inferiores são de utilização mais restrita, pois necessitam de calor rejeitado a altas temperaturas para se tornarem viáveis. Nos fornos Hoffman (cerâmicas) e nos fornos de clínquer com ciclones recuperativos (cimenteiras) este calor é recuperado no preaquecimento de matéria prima e/ou ar de combustão, aumentando de forma significativa a eficiência destes sistemas. Caso o calor rejeitado não possa ser utilizado, uma alternativa é a sua utilização para geração de energia elétrica em turbinas a gás (LORA e NASCIMENTO, 2004).

2.2.2.1 Equações termodinâmicas

A Termodinâmica se ocupa da análise dinâmica da energia em seus fluxos entre diferentes estados; a Primeira Lei quantifica a energia que entra ou sai de certo volume de controle ao passo que a Segunda Lei qualifica as diversas formas de energia. Dessa forma, é a partir das leis termodinâmicas que é possível quantificar a capacidade de produção de trabalho em uma turbina a vapor, bem como distinguir qualitativamente essa capacidade dentre os fluxos extraídos na saída da mesma (SONNTAG et al, 2003).

Segundo Sonntag et al. (2003), o calor (Q) é a forma de energia transferida através da fronteira de um sistema, numa dada temperatura, a outro sistema (ou ao meio externo ao sistema) numa temperatura inferior, em virtude da diferença de temperatura entre os dois sistemas. Para certo período de tempo, pode-se ter um fluxo de calor (\dot{Q}) (equação 1).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

onde C_p é o calor específico a pressão constante do vetor energético em consideração [kJ/kg.K], ΔT é a diferença de temperatura entre os dois sistemas considerados [K ou °C], \dot{m} é o fluxo mássico do vetor energético [kg/s].

Um sistema realiza trabalho mecânico (W) se o único efeito sobre o meio externo ao sistema consistir no movimento relativo de um peso. De igual modo, certa potência de eixo (\dot{W}) pode ser obtida na unidade de tempo (SONNTAG ET AL., 2003):

$$W = \int F dx = \int \left(m \frac{dV}{dx}\right) dx \quad (2)$$

$$\dot{W} = \int \left(\dot{m} \frac{dV}{dx}\right) dx \quad (3)$$

onde F é a força [N], m é massa [kg] e V é a velocidade [m/s].

A estrutura do conhecimento humano atual admite a irreversibilidade dos processos termodinâmicos (as perdas termodinâmicas) como uma verdade; a partir dessa realidade, não é possível imaginar o mundo tal como era concebido nos primórdios da Termodinâmica, em que se definia a conversibilidade integral do calor em trabalho, e vice-versa, sem perdas associadas. Hoje se sabe que, em função da irreversibilidade, a diferença entre o calor e o trabalho - que são essencialmente formas de energia - deve ser uma diferença entre outras formas de energia, e que há um sentido preferencial para que a conversão energética ocorra. Para o entendimento desses conceitos empregam-se as equações básicas, apresentadas a seguir, tomadas em termos de fluxo sobre volume de controle (MORAN e SHAPIRO, 2013).

A Equação de Conservação de Massa (equação 4) pode ser expressa por (MORAN e SHAPIRO, 2013):

$$0 = \frac{\delta}{\delta t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \bar{V} \cdot d\bar{A} \quad (4)$$

onde VC é o volume de controle, SC é a superfície de controle por onde se observa a existência de fluxo, t é o tempo, dV é um elemento de volume, \bar{v} é o vetor velocidade e $d\bar{A}$ é um elemento de área em condição vetorial, isto é, $d\bar{A} = \bar{n} dA$, sendo \bar{n} o vetor normal à superfície.

De acordo com a equação 4, a variação de massa do volume de controle somada a todos os fluxos que entram e saem através das superfícies de controle correspondem à variação nula de massa no sistema. A expressão para o fluxo ou vazão em massa é dada por:

$$\dot{m} = \rho \cdot AV \quad (5)$$

A equação da Primeira Lei da Termodinâmica ou Equação de Conservação de Energia em regime permanente é expressa matematicamente por (MORAN e SHAPIRO, 2013):

$$\dot{Q} - \dot{W}_{e,mec} = \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (6)$$

onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2), z é a cota (m) e h é a entalpia (kJ/kg). As energias cinética, potencial e a entalpia têm por unidade (m^2/s^2) no Sistema Internacional, que, multiplicadas pela unidade de vazão, resulta em Watt ou um de seus múltiplos (kW ou MW), desde que convenientemente agrupados.

A Segunda Lei da Termodinâmica, concebida no trabalho teórico de Carnot, em 1824, é de fundamental importância para o estudo de sistemas de cogeração. A partir das considerações expressas por Carnot, definiu-se o conceito de entropia de modo a caracterizar a condição de irreversibilidade dos fenômenos físicos. Pode-se deduzir que $T ds \geq \delta Q$, isto é, o produto da variação entrópica pela temperatura absoluta tomada em um ponto de referência deve ser superior (na condição irreversível) ou no máximo igual (na condição reversível) à variação do calor em um processo.

A 2ª Lei da Termodinâmica pode ser estabelecida pela relação (MORAN e SHAPIRO, 2013):

$$s_2 - s_1 = ds \geq \frac{\delta Q}{T} \Leftrightarrow T ds \geq \delta Q \quad (7)$$

Sendo que a igualdade se presta aos processos reversíveis (ideais) e a desigualdade aos processos irreversíveis (reais). A variável entropia (s) representa uma propriedade termodinâmica [kJ/kg.K] que mensura o grau de irreversibilidade de um sistema.

2.2.2.2 Ciclo Rankine

Este tipo de ciclo termodinâmico, conhecido também como ciclo de vapor, baseia-se no aproveitamento térmico de um combustível para a produção de vapor (CUNHA e SANTIAGO, 2002). Normalmente utiliza-se no ciclo Rankine uma caldeira, uma turbina a vapor, uma bomba e um condensador, como esquematizado na Figura 7. Para aumentar a eficiência do ciclo, foi criada outra configuração do ciclo Rankine que utiliza também o vapor reaquecido em sua operação.

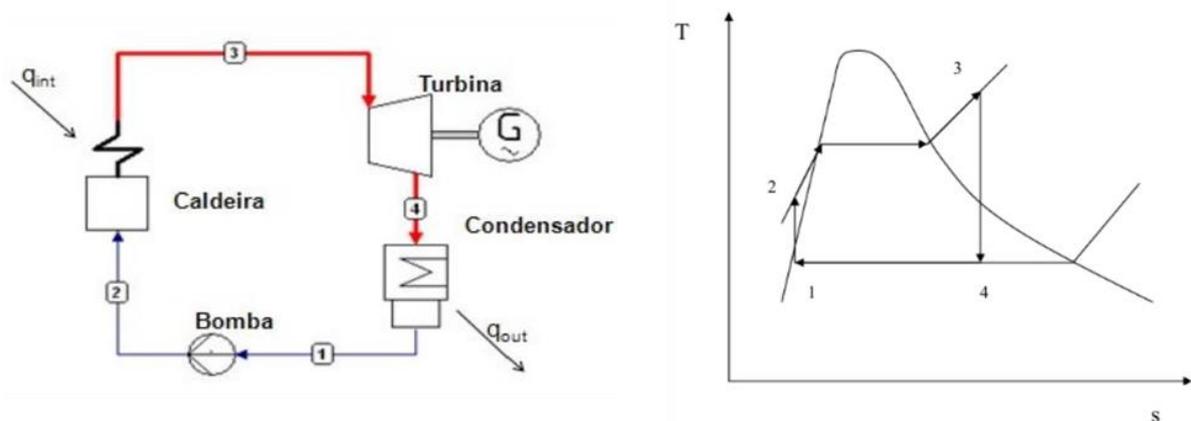


Figura 7 - Representação esquemática e diagrama temperatura e entalpia ($T - s$) para o ciclo Rankine simples

Fonte: Moran e Shapiro, 2013

Pode-se observar na Figura 7 os processos que ocorrem no ciclo Rankine simples que são:

- 1-2: Processo de bombeamento adiabático reversível na bomba.
- 2-3: Transferência de Calor a pressão constante na caldeira.
- 3-4: Expansão adiabática reversível na turbina.
- 4-1: Transferência de calor a pressão constante no condensador.

Pode-se observar no diagrama $T-s$ que o processo de bombeamento é isoentrópico. Considerando regime permanente, processo adiabático (calor trocado na bomba é nulo) e desprezando a variação das energias cinética e potencial, a primeira Lei da Termodinâmica, para a bomba, pode ser escrita como (MORAN e SHAPIRO, 2013):

$$W_{bomba} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (8)$$

onde W_{bomba} é o trabalho na bomba (kW), h_2 é a entalpia de saída da bomba (kJ/kg), h_1 é a entalpia de entrada na bomba (kJ/kg).

Das relações termodinâmicas, sabe-se que $T ds = dh - v dP$. Para a bomba $ds=0$, portanto $dh = v dP$. Logo:

$$(h_2 - h_1) = v(P_2 - P_1)$$

$$w_{bomba} = v(P_2 - P_1) \quad (9)$$

onde ds é a variação de entropia (kJ/kg.K), dh é a variação da entalpia (kJ/kg), dP é a variação da pressão (bar ou kPa), T é a temperatura (K ou °C), v é o volume específico (m³/kg), P_2 é a pressão de saída na bomba (bar ou kPa), P_1 é a pressão de entrada na bomba (bar ou kPa).

Na caldeira tem-se adição de calor a pressão constante, e o fluido de trabalho (água), que entra como líquido comprimido e sai como vapor superaquecido ou vapor saturado. Da primeira lei, desprezando as variações de energia cinética e potencial e levando em consideração o trabalho nulo na caldeira, o calor fornecido pela caldeira é dado por (MORAN e SHAPIRO, 2013):

$$Q_H = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (10)$$

onde, Q_H é o calor fornecido pela caldeira (kW), h_3 é a entalpia de saída na caldeira (kJ/kg), h_2 é a entalpia de entrada na caldeira (kJ/kg).

Na turbina, o trabalho produzido através do fluido de trabalho que entra como vapor saturado seco ou superaquecido e sai como vapor saturado úmido ou saturado seco, aplicando a primeira Lei da Termodinâmica e considerando o processo como adiabático e desprezando as variações de energia cinética e potencial, é (MORAN e SHAPIRO, 2013):

$$W_t = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (11)$$

onde W_t é o trabalho produzido na turbina (kW), h_3 é a entalpia de entrada na turbina (kJ/kg), h_4 é a entalpia de saída na turbina (kJ/kg).

No condensador ocorre a transferência do calor do fluido de trabalho que entra como vapor saturado úmido ou saturado seco e sai como líquido saturado. A Primeira Lei da Termodinâmica, desprezando as energias cinéticas e potenciais e sendo nulo o trabalho no condensador é dada por:

$$Q_L = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (12)$$

onde Q_L é o calor rejeitado no condensado (kW), h_4 é a entalpia de entrada no condensador (kJ/kg), h_1 é a entalpia de saída no condensador (kJ/kg).

É importante enfatizar que o rendimento (η) do Ciclo Rankine é menor que o rendimento do Ciclo Carnot. E é dado pelas equações:

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H}$$

$$\eta = \frac{(h_3 - h_2) - (h_1 - h_4)}{(h_3 - h_2)} \quad (13)$$

2.2.2.3 Caldeiras

As caldeiras, ou geradores de vapor, é um equipamento que utiliza a energia química liberada durante a combustão de um combustível para promover a mudança de fase da água do estado líquido para vapor, a uma pressão muitas vezes maior que a atmosférica e podem ser do tipo flamotubulares ou aquatubulares. As flamotubulares são assim chamadas devido ao fato de que os gases da combustão passam através de tubos imersos em água. Os tubos, por sua vez, aquecem a água, criando o vapor. Trata-se de um tipo de caldeira com construção mais simplificada em relação à distribuição de tubos, podendo classificá-los em verticais e horizontais (ANDRADE, 2017). Um exemplo de caldeira flamotubular é mostrado na Figura 8.

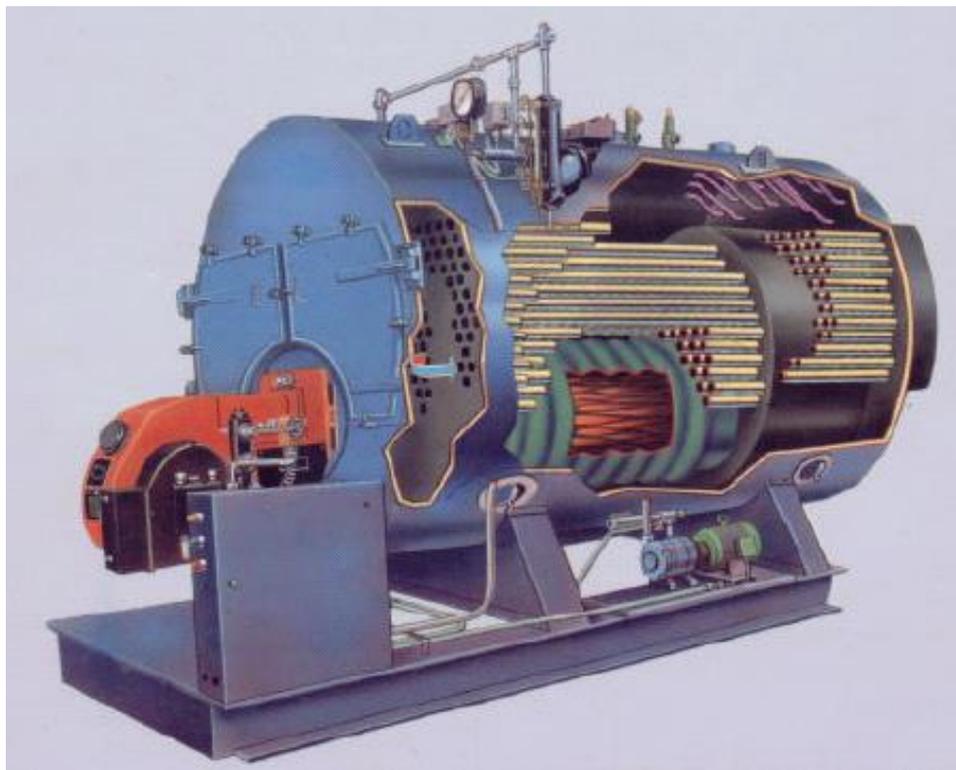


Figura 8 - Caldeira flamotubular.

Fonte: ANDRADE, 2017

As caldeiras flamotubulares são fabricadas para operarem até 2.500 kPa, e com vazões de até 25 toneladas de vapor por hora. Acima destas condições torna-se inviável a sua fabricação, devido às elevadas espessuras de chapas necessárias. São caldeiras que apresentam custos de manutenção menores se comparados com as aquatubulares (ANDRADE, 2017).

Nas caldeiras aquatubulares a água passa dentro dos tubos, e os gases de combustão por fora dos mesmos. São equipamentos que podem ser fabricados para pressões e vazões elevadas, podendo gerar vapor saturado e superaquecido. São particularmente aplicadas onde se utilizam turbinas a vapor para geração de energia elétrica em instalações de grande capacidade. Um exemplo de caldeira aquatubular é ilustrado na Figura 9. Uma característica importante nestas caldeiras é a necessidade de um rigoroso tratamento de água, com baixos teores de sais e pH controlados em função da pressão de operação. Qualquer incrustação, por menor que seja, pode provocar o rompimento dos tubos. Um sistema muito utilizado é a desmineralização da água, que pode ter diversas tecnologias. Um deles é a passagem da água por resinas de propriedades específicas (acidez ou alcalinidade forte), com a retenção dos sais minerais contidos na água. (PERA, 1990).

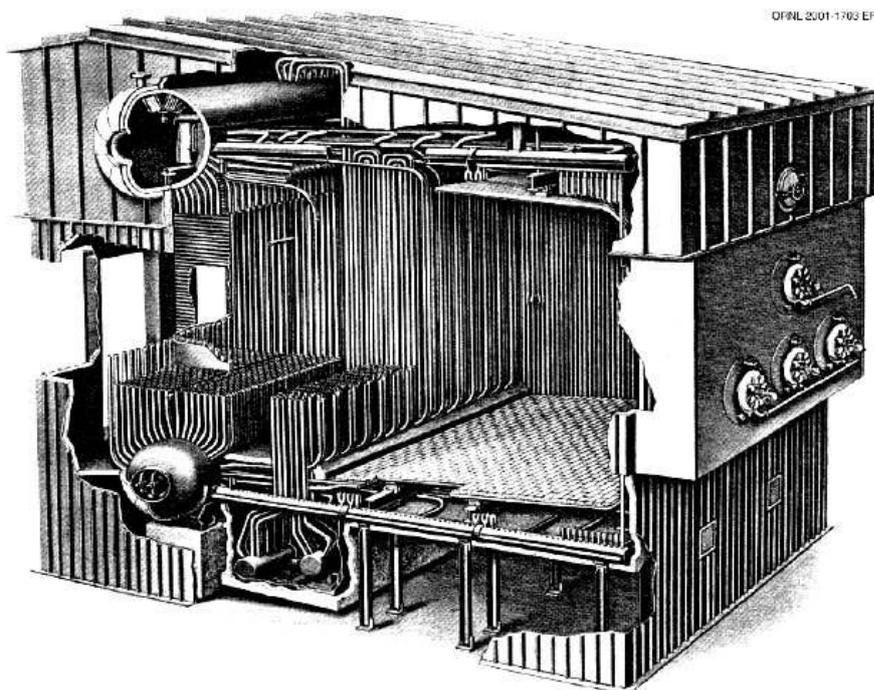


Figura 9 - Caldeira aquatubular.

Fonte: DEPARTMENT OF ENERGY USA, 2004

A fornalha é a parte da caldeira onde se converte a energia química do combustível em energia térmica. Para biomassa e em unidades de pequeno ou de médio porte se utilizam as fornalhas com grelhas (TEIR, 2002).

A combustão em uma fornalha para queima em grelhas é mostrada na Figura 10. A região de secagem (eliminação da umidade), a Pirólise (decomposição térmica), a combustão dos voláteis e a combustão do coque (TEIR, 2002).

As grelhas inclinadas são aplicáveis a qualquer tipo de biomassa, mesmo em casos onde a umidade é superior a 50%. São usadas na queima de cavacos de lenha, resíduos florestais, resíduos industriais, cascas de cereais e outras biomassas (PERA, 1990). As grelhas podem ser fixas ou móveis, para facilitar o escoamento da biomassa a ser queimada e a retirada das cinzas resultantes do processo de combustão (TEIR, 2002).

O ar que atravessa o leito (ar primário) tem a função de refrigerar as grelhas e promover uma distribuição uniforme em todo o combustível (conforme mostrado na Figura 10).

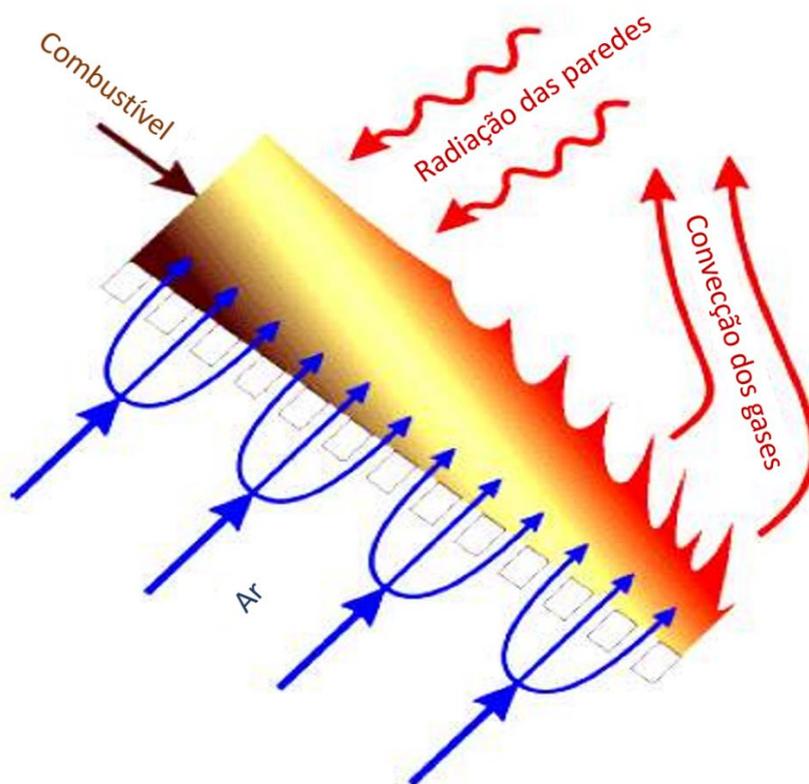


Figura 10 - Processo de combustão em grelha inclinada.

Fonte: Adaptado de TEIR, 2002

A queima prossegue com o ar secundário injetado sobre o leito de biomassa, consumindo-se o material volátil liberado da matriz sólida da mesma. Para que o ar primário se mantenha bem distribuído ao longo de toda a grelha, as cinzas devem ser retiradas periodicamente (BAZZO, 1995).

Conforme Dornburg e Faaij (2001), a utilização de grelhas para queima direta e turbinas a vapor são aplicadas para a faixa de capacidade de 1 a 20 MW de energia elétrica produzida, com uma eficiência elétrica em torno de 25%. Para melhorar esta eficiência, os autores sugerem a utilização de leito fluidizado e gaseificação, podendo atingir até 38%. Esta tecnologia ainda não apresenta viabilidade de implantação.

De acordo com Nogueira (2003), nos diversos tipos de caldeiras disponíveis no mercado, existem componentes com características e funções específicas. Na Figura 11 apresentam-se os mesmos com a respectiva numeração.

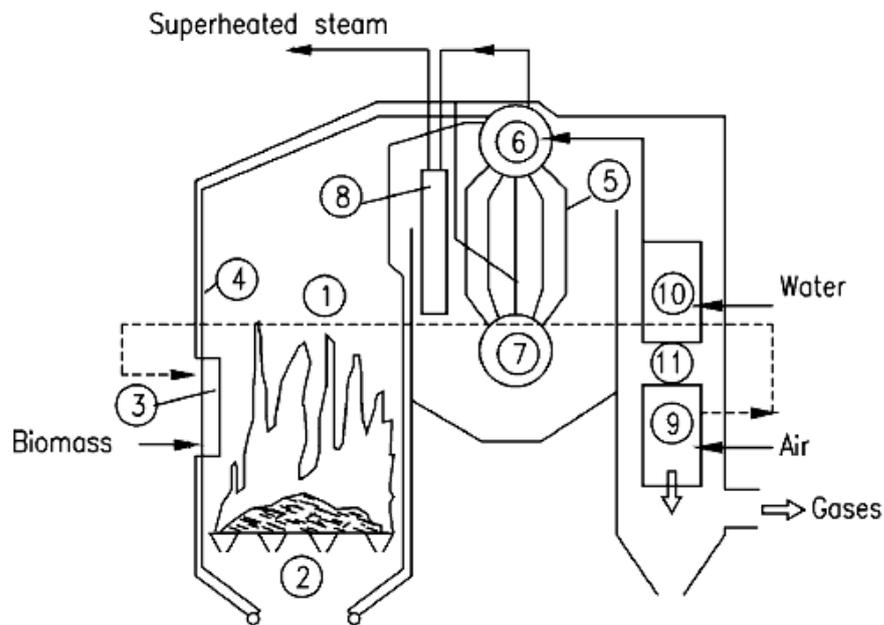


Figura 11 - Partes principais de uma caldeira aquatubular a biomassa.

Fonte: NOGUEIRA, 2003

Conforme observado na Figura 11, as partes principais de uma caldeira aquatubular são:

- 1 – Fornalha: Câmara para a combustão da biomassa;
- 2 – Grelha: Sistema que suporta a biomassa a ser queimada, distribuindo o ar primário e garantindo a retirada das cinzas;
- 3 – Alimentadores de biomassa: Fornece o material a ser queimado na fornalha, distribuindo o mesmo de forma homogênea nas grelhas;
- 4 – Paredes de água: Paredes formadas por tubos, por onde a água circula absorvendo o calor da combustão;
- 5 – Feixe convectivo: Tubos que fazem a ligação dos tubulões superior e inferior, onde ocorre a evaporação da água com o calor dos gases da combustão (também chamada de superfície evaporativa);
- 6 – Tambor superior: Cilindro que recebe a água de alimentação e a mistura bifásica das superfícies evaporativas, promovendo a separação do vapor e da água. A água desce através dos tubos descendentes e o vapor saturado sai pela parte superior para o superaquecedor;
- 7 – Tambor inferior: Cilindro que coleta a água em evaporação;
- 8 – Superaquecedor: Trocador de calor tipo feixe tubular que aumenta a temperatura do vapor saturado, transformando-o em vapor superaquecido;

9 – Pré-aquecedor de ar: Superfície que aquece o ar que será utilizado na combustão da biomassa. Recebe calor dos gases de combustão;

10 – Economizador: Trocador de calor que preaquece a água de alimentação da caldeira a partir da energia dos gases de combustão.

2.2.2.4 Turbina a vapor

A turbina a vapor converte a energia térmica contida no fluido de trabalho em energia mecânica, acionando um eixo acoplado ao gerador síncrono. O vapor superaquecido à alta pressão e temperatura, entra nos bocais e é acelerado, convertendo a energia térmica em energia cinética. O fluxo passa, então, para as partes móveis da turbina (pás), exercendo uma força tangencial no rotor, para girar o eixo ao qual o gerador se encontra acoplado. No deslocamento axial do vapor em relação ao eixo da turbina, sua pressão cai e seu volume específico aumenta. As pás dos últimos estágios devem ser maiores, para acompanhar esta variação (LORA e NASCIMENTO, 2004).

Existem diversas classificações para as turbinas a vapor:

a) Fabricação: As turbinas podem ser de ação ou reação.

Nas turbinas de ação o vapor se expande somente nos bocais, havendo uma queda de pressão e aumento da energia cinética. Este vapor com alta velocidade incide sobre as pás móveis, convertendo sua energia cinética em trabalho mecânico. Interessante notar que a pressão se mantém constante nas pás móveis (Figura 12). As turbinas de ação são normalmente aplicadas para modelos de baixa capacidade (RINO, 2008).

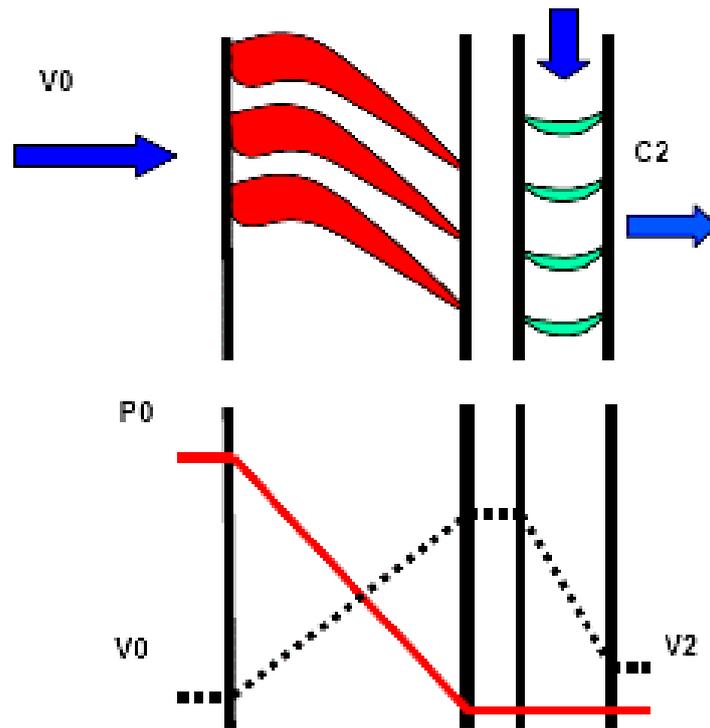


Figura 12 - Turbinas de ação.

Fonte: RINO, 2008

As turbinas de reação são projetadas para que a pressão diminua ao longo das pás fixas e móveis (Figura 13). As turbinas de reação são mais eficientes e compactas, pois possuem menos estágios. (RINO, 2008).

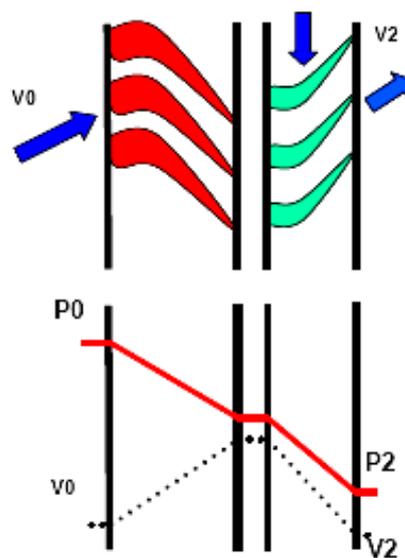


Figura 13 - Turbinas de reação.

Fonte: RINO, 2008

b) Quantidade de estágios: simples estágio ou múltiplos estágios. As turbinas de simples estágio apresentam um único rotor. As turbinas de múltiplos estágios podem apresentar rotores de ação ou de reação (RINO, 2008).

c) Quanto à descarga: contrapressão ou condensação (Figura 14).

As turbinas a contrapressão são recomendadas para processos industriais onde a demanda de calor é aproximadamente igual à demanda de trabalho. Possuem uma regulação que mantém a pressão na saída da turbina constante. As turbinas de condensação são utilizadas onde se necessita da maior quantidade de energia eletromecânica gerada. Normalmente a sua saída é conectada a um condensador que opera com um vácuo (pressão abaixo da atmosférica). Desta forma, produzem mais energia elétrica que as de contrapressão para uma mesma vazão, pressão e temperatura do vapor na sua admissão (BALESTIERI, 2002).

Para ambos os tipos de turbinas podem existir extrações de vapor na pressão necessária para o atendimento de certo processo industrial.

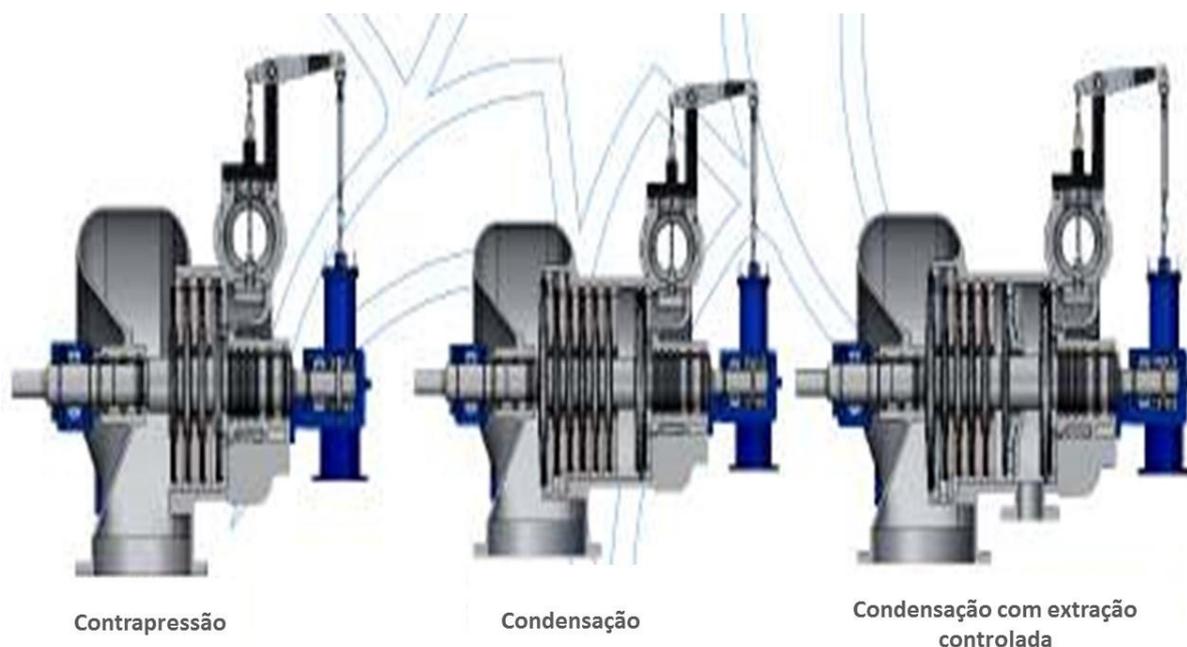


Figura 14 - Turbinas de contrapressão e condensação

Fonte: ENGECROL, 2007

Para qualquer tipo de instalação com turbinas a vapor, quanto maior a pressão e temperatura do vapor à entrada, menor será a vazão de vapor necessária para gerar a mesma quantidade de energia, desde que as condições na exaustão sejam as mesmas.

Isto permite entender a tendência de expansão da cogeração no setor sucroalcooleiro atual com a instalação de novas caldeiras de alta pressão, pois para aumentar a pressão de vapor em um sistema de cogeração existente, deve-se trocar a caldeira. Os novos projetos já utilizam este conceito e empregam sistemas de geração de vapor a altas pressões e temperaturas.

Pavlas et al (2006) realizaram um estudo, no qual para uma mesma demanda térmica (10 MW) se comparam: (i) uma turbina a contrapressão que produz 2,0 MWe e (ii) uma turbina a condensação que produz 2,8 MWe. O fator de utilização da energia elétrica (percentual de aproveitamento da energia contida no combustível), nos sistemas é de 90% e 79%, respectivamente. A explicação é que apesar de se produzir mais energia elétrica (devido à pressão negativa no condensador) as perdas de “custos” no mesmo são altas. Ou seja, a perda no condensador é significativa.

Conforme Caputo, Palumbo e Scacchia (2004), uma solução de arranjo com turbina de condensação com extração é a mais adequada para uma vazão de vapor que varia mediante a necessidade de processo. Com isto, é necessário à instalação de um condensador de baixa pressão. Desta forma tem-se a flexibilidade operacional necessária a variação da demanda térmica. Para o caso analisado pelos autores, observou-se que no verão a produção de energia elétrica é maximizada (5.085 kWe) pois não há demanda térmica. Neste período não se utiliza aquecimento distrital devido a altas temperaturas ambientes. No inverno se produz energia térmica (16.120 kWt) e também energia elétrica (2.064 kWe).

Na Figura 15 identifica-se as diferenças entre os arranjos: turbina de condensação, turbina de condensação com extração e turbina de contrapressão que foram consideradas no estudo.

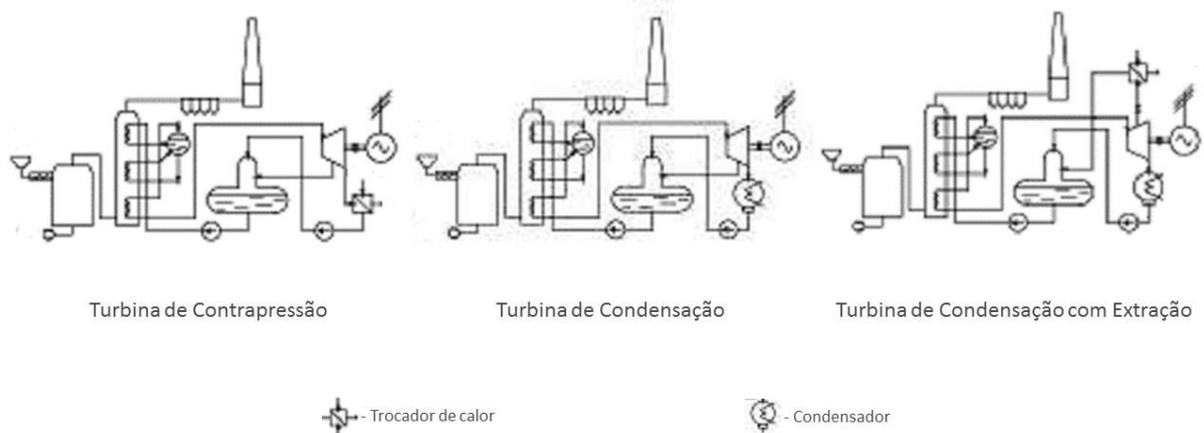


Figura 15 - Configurações de plantas de geração de energia elétrica a vapor

Fonte: CAPUTO; PALUMBO; SCACCHIA, 2004

Como visualizado na Figura 15 a turbina de condensação com extração, a mesma alimenta um trocador de calor e a saída é conectada a um condensador, já na de contrapressão, existe um trocador de calor na saída da mesma (não possui condensador). Na turbina de condensação, não existe o trocador de calor e o vapor vai direto para o condensador, sendo que existe uma extração de vapor para o desaerador.

Ocorre que à medida que se opera com a turbina a vapor fora das condições de projeto da mesma (off-design), a sua eficiência é fortemente reduzida e não varia de forma proporcional a queda de vazão de vapor segundo Savola e Keppo (2005) e Horlock (1997).

2.2.2.5 Sistema de condensação

O condensador é um trocador de calor no qual se realiza a conversão do vapor de exaustão da turbina ao estado líquido, a fim de reutilizar a água no ciclo térmico para alimentação da caldeira. A maioria dos projetos utiliza água como fluido de resfriamento, no entanto, existem projetos que utilizam refrigeração a ar, geralmente em locais com poucos recursos hídricos (SANTOS, 2012).

Para manter um nível adequado de vácuo no condensador é necessário remover constantemente os gases não condensáveis. Para isto são utilizados ejetores que operam com vapor. Também existem projetos com bombas de vácuo.

Na Figura 16 apresenta-se um condensador de vapor.

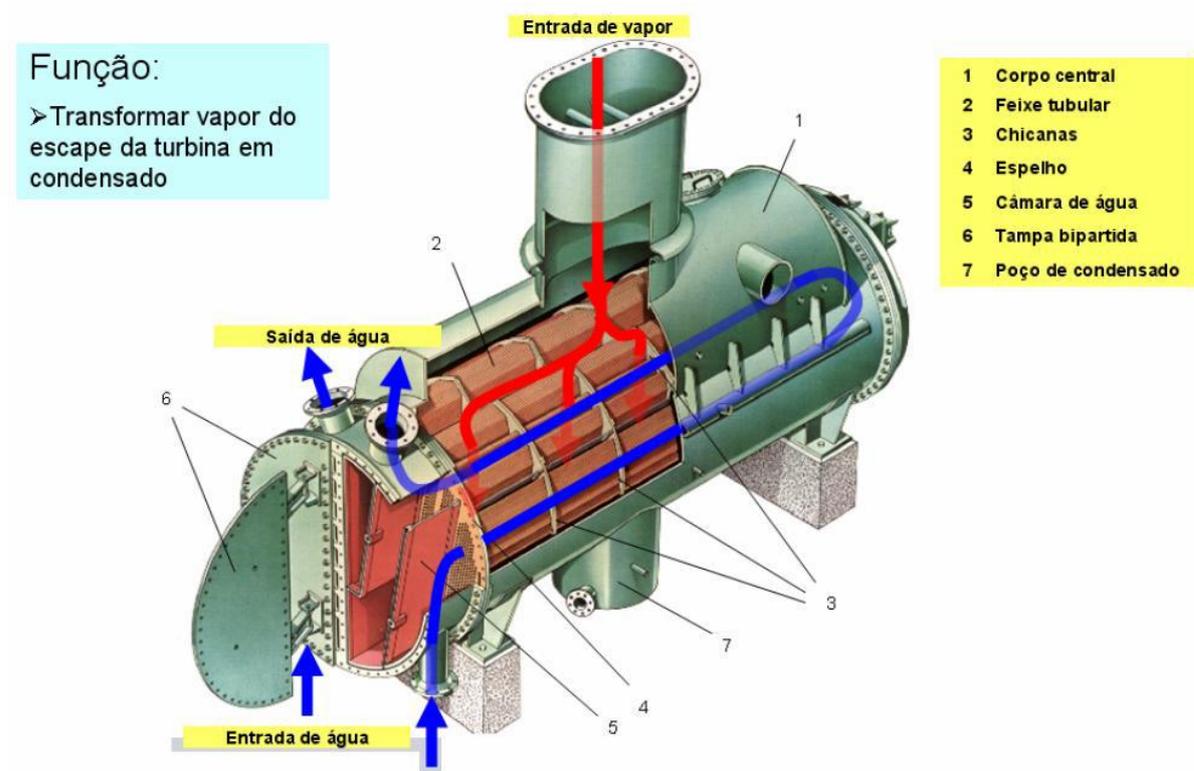


Figura 16 – Condensador refrigerado à água tipo casco-tubo

Fonte: PUTMAN e JARESCH, 2008

De acordo com o esquema da Figura 16, o vapor de exaustão da turbina entra no condensador e a condensação ocorre quando o vapor entra em contato com a superfície dos tubos, os quais são constantemente resfriados pela água que circula no interior dos mesmos com o auxílio de uma bomba. Esta água é proveniente de uma torre de resfriamento. Não há contato algum do vapor com a água de resfriamento. Os tubos no interior do condensador são dotados de alta resistência à erosão e corrosão, já que sua parede externa permanece em constante contato com vapor e gases incondensáveis que são arrastados com o vapor e apresentam características corrosivas. O ejetor a vapor remove os gases não condensáveis do interior do condensador e mantém um nível de vácuo ótimo para operação da turbina, levando em consideração que, quanto melhor for o vácuo produzido, melhor será o aproveitamento energético do vapor no interior da turbina. O conceito é garantir que o vapor, ao sair da turbina, tenha esgotado ao máximo seu potencial energético, transformando a energia térmica do vapor em energia mecânica no eixo da máquina. Ou seja, a potência mecânica produzida pela turbina de condensação está diretamente associada à atuação dos ejetores no sistema de condensação. Uma elevação do nível de pressão do vapor de exaustão da turbina tende a comprometer a performance do conjunto (SANTOS, 2012).

Diferentemente das turbinas de contrapressão, a pressão no escape da turbina de condensação não está associada ao processo industrial. O dimensionamento desta pressão é livre, restringindo-se apenas às limitações mecânicas de projeto da turbina e do condensador (SANTOS, 2012).

O condensado é coletado em um poço montado na parte inferior do feixe tubular e possui volume suficiente para garantir a operação adequada das bombas de condensado.

2.2.3 Análise de sistemas de cogeração

2.2.3.1 Análise com o método α

Os setores industriais em análise necessitam de vapor em algumas etapas de seus processos em atividades de secagem, de evaporação, aquecimento ou cozimento e de energia elétrica ou mecânica para transporte de materiais, bombeamento, acionamento de motores, compressores, bombas, correias transportadoras e guindastes, dentre outras possibilidades. Nesses casos, é possível configurar tais necessidades de forma genérica a partir de parâmetros adimensionais que as relacionam (BALESTIERI, 2002).

Os parâmetros importantes a serem discutidos são:

- Razão entre calor e potência elétrica (heat-to-power ratio) que caracteriza cada equipamento usado no sistema de cogeração;
- Consumo específico de vapor (steam rate) [kg/kWh];
- Consumo específico de combustível [kg/kWh];
- Consumo específico de calor (heat rate) [kJ/kWh];
- Eficiência termodinâmica global do equipamento;
- Variações da eficiência sob cargas parciais;
- Temperatura do fluxo térmico retirado do equipamento [°C];
- Limite de rejeição do equipamento;
- Disponibilidade e confiabilidade do equipamento.

Uma vez que, de uma forma geral, essas relações não são coincidentes com as relações de demanda de potência e calor da unidade industrial, a escolha de uma tecnologia em detrimento das demais implica quase sempre no atendimento total de apenas uma das duas formas de demanda energética.

A razão calor/potência elétrica (*heat-to-power ratio*) de uma máquina térmica é a razão entre duas variáveis de iguais unidades: E' que é a potência elétrica gerada [kWe] e S' que é a potência térmica gerada [kWt]. No termo E' estão reunidas as formas mecânica e/ou elétrica geradas e no termo S' estão as potências térmicas na forma de vapor e/ou água quente e/ou água gelada, todas obtidas pela central de cogeração a partir de sua operação em plena carga ou em carga parcial. Na Tabela 2 mostra a razão calor/potência elétrica de componentes do sistema de cogeração.

Tabela 2 - Razão Calor/potência elétrica e outros parâmetros do sistema de cogeração

Sistema de cogeração	Razão calor/potência (kWt/kWe)	Potência de saída (como % da entrada do combustível)	Eficiência global (%)
Turbina a vapor de contrapressão	4,0 – 14,3	14 – 28	84 – 92
Turbina a vapor de extração- condensação	2,0 – 10	22 – 40	60 – 80
Turbina a gás	1,3 – 2,0	24 – 35	70 – 85
Ciclo combinado (turbina a gás e turbina a vapor)	1,0 – 1,7	34 – 40	69 – 83
Motor de combustão interna	1,1 – 2,5	33 – 53	75 – 85

Fonte: Devki Energy Consultancy, 2006

Uma análise do setor ou instalação industrial pode ser realizada utilizando valores de demanda médios consumidos (LORA e NASCIMENTO, 2004). O parâmetro α é calculado por:

$$\alpha = \frac{E}{S} \quad (14)$$

onde α é a razão entre a energia elétrica e calor consumidos, E é a potência eletromecânica consumida no segmento (kWe), S é a potência consumida no segmento (kWt).

Na Tabela 3 apresentam-se alguns setores industriais com os respectivos valores do parâmetro α :

Tabela 3 - Valores típicos do parâmetro α para os setores industriais

Setor industrial	α
Açúcar e Álcool	0,11 a 0,09
Papel e Celulose	0,18 a 0,23
Têxtil	0,40 a 0,44
Petroquímica	0,21 a 0,25
Alimentos e Bebidas	0,05 a 0,10

Fonte: Adaptado de Nogueira, 1996

Savola e Fogelholm (2006) discutem como pequenas alterações nos arranjos de instalações de cogeração com utilização de biomassa aumentam o valor de α . Por exemplo, em uma instalação de 1,8 MWe ($\alpha = 0,23$), a instalação de um trocador de dois estágios no aquecimento distrital promoveu o aumento de α para 0,26. Por outro lado, com a instalação de um trocador de calor para reaquecimento do vapor e um trocador de calor para pré-aquecer a água que vai entrar na caldeira, este parâmetro aumentaria para 0,25. Outro exemplo citado pelo autor, para uma instalação de 6 MWe ($\alpha = 0,34$), com a instalação de um trocador de dois estágios no aquecimento distrital o α aumentou para 0,39. Por outro lado, com a instalação de um trocador de calor para reaquecimento do vapor e um trocador de calor para preaquecer a água que vai entrar na caldeira, o α aumentou para 0,42 (acréscimo de 23,5%).

Segundo Marbe, Harvey e Berntsson (2004), a cogeração baseada em sistemas tradicionais com turbinas a vapor de contrapressão, é aplicável em setores industriais com baixo valor de parâmetro α .

Balestieri (2002) ainda indica que a eficiência global de cogeração é calculada a partir da razão entre todas as formas de energia efetivamente aproveitada no ciclo e o calor produzido pela queima do combustível. Seu valor varia geralmente entre 70% e 90% e é obtido através da seguinte equação:

$$\eta_{g,cog} = \frac{E' + S'}{\sum_i \dot{m}_{c,i} PCI_i} \quad (15)$$

onde E' é a potência elétrica gerada pelo sistema de cogeração (kWe), S' é a potência térmica gerada pelo sistema de cogeração (kWt), PCI é o poder calorífico inferior (kJ/kg), $\dot{m}_{c,i}$ é a vazão mássica de combustível (kg/s), $\eta_{g,cog}$ é a eficiência global de cogeração

Outra característica das centrais de cogeração se dá devido ao seu modo de operação. Este é definido como sendo o caminho no qual os sistemas devem operar, assegurando a viabilidade da instalação. Nesse sentido os fatores técnicos e econômicos devem ser relacionados com o modo de operação escolhido para complementar a avaliação de implantação do sistema. Portanto, a definição da estratégia operacional de um projeto é fundamental, visto que nela se encerra a filosofia da empresa relacionando o atendimento das suas necessidades energéticas: autossuficiência, excedente ou *déficit* (BALESTIERI, 2002).

De acordo com Balestieri (2002), de forma geral, as estratégias de operação admitidas para os sistemas de cogeração se resumem em três aspectos: paridade térmica ou atendimento da demanda térmica, paridade elétrica ou atendimento da demanda eletromecânica e despacho econômico.

Na paridade térmica, a central de cogeração é projetada para operar de acordo com os requisitos térmicos da unidade de processo, de maneira que o calor é o produto principal e a eletricidade é o subproduto da cogeração. O sistema deve ser conectado a rede de concessionária, de modo a propiciar a venda de eletricidade excedente ou a compra de eletricidade adicional para o caso de déficit, dependendo dos perfis de demandas do estabelecimento e das condições operacionais (BALESTIERI, 2002).

Na paridade elétrica, a central de cogeração é projetada de modo a atender os requisitos eletromecânicos da unidade de processo, de modo que a eletricidade é o produto principal e o calor é o subproduto da cogeração. Se o calor produzido é insuficiente para satisfazer as necessidades do estabelecimento, um sistema auxiliar é acionado para produzir esta diferença. Em caso contrário, parte do calor produzido na central de cogeração é rejeitado para o ambiente. A eletricidade pode ser importada se a central não for suficiente para atender a demanda ou suplementada pela central de utilidades (BALESTIERI, 2002).

O despacho econômico corresponde à colocação da central de cogeração em funcionamento apenas nos períodos em que a tarifa paga à concessionária apresenta um retorno

que interessa ao investidor. A central de cogeração poderá ficar desligada da concessionária nos casos em que não houver uma atratividade econômica em sua operação, ainda que isto implique custos devido a ociosidade dos equipamentos (BALESTIERI, 2002).

2.2.3.2 Análise usando valores instantâneos ou curvas de duração

Com os valores das demandas e da capacidade de produção de energia elétrica e térmica, pode-se levantar uma curva com os excedentes e os déficits de energia. É o chamado método da convolução, mostrado na Figura 17.

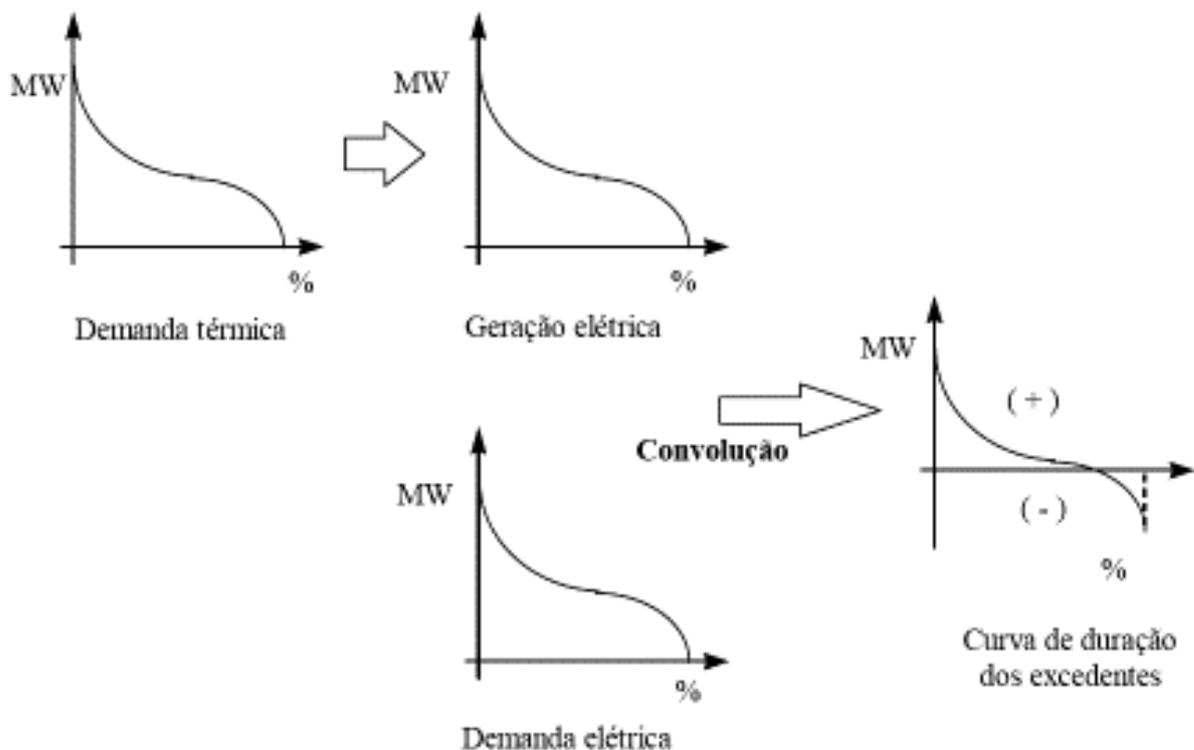


Figura 17 - Método da convolução

Fonte: LORA e NASCIMENTO, 2004

Como apresentado na Figura 17, calculam-se os valores excedentes de energia elétrica (a serem vendidos) e os valores deficitários (a serem comprados). Este método é utilizado para identificação dos déficits e excedentes de energia. A análise dos valores reais de demanda elétrica e térmica, apesar de mais complexa, permite um maior conhecimento dos fluxos de energia entre o autoprodutor, o consumidor e a concessionária de energia elétrica (LORA e NASCIMENTO, 2004).

2.2.3.3 Operação fora do ponto de projeto (off-design)

Quando as demandas elétricas e de calor são diferentes daquelas que o sistema de cogeração gera na sua condição de projeto, as mesmas se encontram em off-design. Na Figura

18, tem-se uma representação gráfica desta situação, sendo que as produções máximas de calor e trabalho são representadas respectivamente por Q_u^* e W^* .

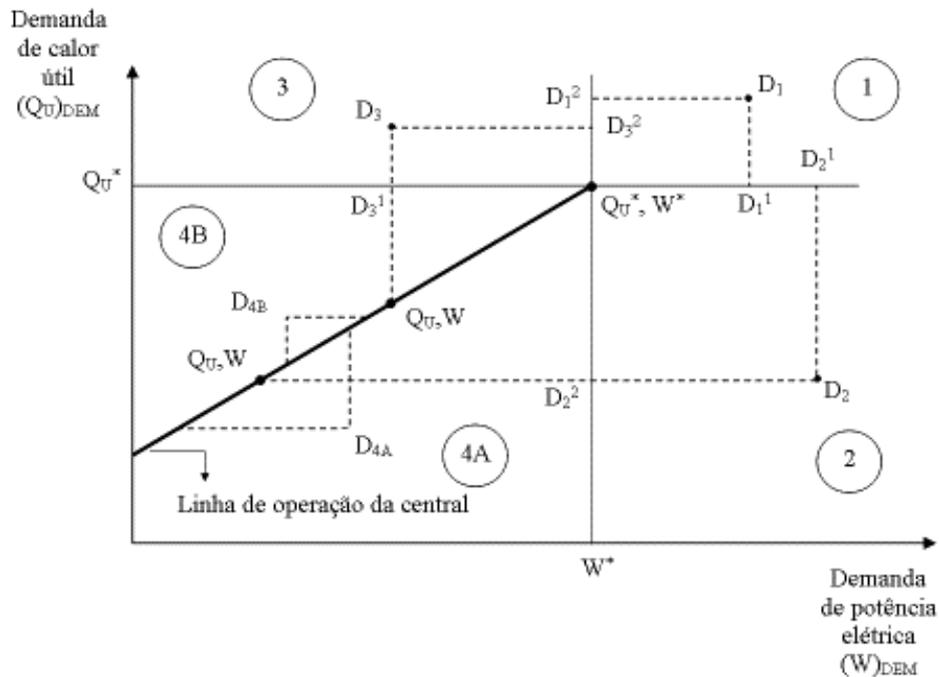


Figura 18 - Operação de uma central de cogeração fora do ponto de projeto

Fonte: Adaptado de HORLOCK, 1997

Detalhando-se a operação nos diversos quadrantes, Horlock (1997) concluiu que:

- Quadrante 1: Tanto o calor como a eletricidade deverão ser comprados. Para os pontos D_1^1 somente necessita-se comprar eletricidade e para D_1^2 calor deve ser adquirido, ou outra caldeira acionada;
- Quadrante 2: Tem-se excesso de calor para ser vendido, e energia elétrica deve ser comprada. Caso a opção seja operar no ponto Q_u, W não se terá calor em excesso, porém mais eletricidade necessitará ser comprada;
- Quadrante 3: Neste caso há excesso de energia elétrica podendo ser vendida, porém calor deve ser comprado ou outra caldeira acionada. Operando em Q_u, W atende-se a necessidade de eletricidade e mais calor deve ser provido;
- Quadrante 4A: As duas demandas são inferiores a capacidade da cogeração, sendo que no ponto de projeto, calor e eletricidade podem ser vendidos. Poderia ainda operar no ponto Q_u, W atendendo a eletricidade com excedente de calor ou atendendo ao calor com déficit de eletricidade;

- Quadrante 4B: Novamente as duas demandas são inferiores a capacidade da cogeração. Poderia ainda operar no ponto Q_u, W atendendo a eletricidade com déficit de calor ou atendendo ao calor com excedente de eletricidade.

Para se trabalhar com paridade térmica, as condições operacionais devem estar nos quadrantes 2 e 4.

2.3 Indústria Cafeeira

2.3.1 Café no Brasil

O café chegou ao norte do Brasil, mais precisamente em Belém, em 1727, trazido da Guiana Francesa para o Brasil pelo Sargento-Mor Francisco de Mello Palheta a pedido do governador do Maranhão e Grão Pará, que o enviara às Guianas com essa missão. Já naquela época o café possuía grande valor comercial (TAUNAY, 1939).

Devido às nossas condições climáticas, o cultivo de café se espalhou rapidamente com produção voltada para o mercado doméstico. Em sua trajetória pelo Brasil o café passou pelo Maranhão, Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Minas Gerais. Num espaço de tempo relativamente curto, o café passou de uma posição relativamente secundária para a de produto-base da economia brasileira. Desenvolveu-se com total independência, ou seja, apenas com recursos nacionais, sendo, afinal, a primeira realização exclusivamente brasileira que visou a produção de riquezas (TAUNAY, 1939).

Depois de uma longa crise, a cafeicultura nacional se reorganizou e os produtores, industriais e exportadores voltaram a alimentar esperanças de um futuro melhor. A busca pela região ideal para a cultura do café se estendeu por todo o país, se firmando hoje em regiões do Estado de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Espírito Santo, Bahia e Rondônia. O café continua hoje, a ser um dos produtos mais importantes para o Brasil e é, sem dúvida, o mais brasileiro de todos (NEVES, 1974).

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC, 2017), o Brasil é o maior produtor mundial de café, sendo responsável por 30% do mercado internacional, volume equivalente à soma da produção dos outros seis maiores países produtores. É também o segundo mercado consumidor, atrás somente dos Estados Unidos.

As áreas cafeeiras estão concentradas no centro-sul do país, onde se destacam quatro estados produtores: Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo e Paraná. A região Nordeste também tem plantações na Bahia, e da região Norte pode-se destacar Rondônia.

A produção de café arábica se concentra em São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Bahia e parte do Espírito Santo, enquanto o café robusta é plantado principalmente no Espírito Santo e Rondônia.

Na Tabela 4 vê-se os principais produtores mundiais no ano de 2010 a 2015, com destaque para o Brasil, o maior produtor.

Tabela 4- Principais países produtores mundiais de café (por mil sacas de 60kg).

Países	2015		2014		2013		2012		2011		2010	
	Produção	Part. (%)										
*Brasil	43.200	30,13	45.346	31,97	49.152	33,49	50.826	34,44	43.484	31,84	48.095	35,99
Vietnan	27.500	19,18	27.500	19,39	27.500	18,74	25.000	16,94	26.500	19,40	20.000	14,97
Colômbia	13.500	9,41	12.500	8,81	12.124	8,26	9.927	6,73	7.652	5,60	8.523	6,38
Indonésia	11.000	7,67	9.000	6,34	11.667	7,95	13.048	8,84	7.288	5,34	9.129	6,83
Etiópia	6.400	4,46	6.625	4,67	6.527	4,45	6.233	4,22	6.798	4,98	7.500	5,61
Índia	5.800	4,04	5.517	3,89	5.075	3,46	4.977	3,37	4.921	3,60	4.728	3,54
Honduras	5.800	4,04	5.400	3,81	4.568	3,11	4.537	3,07	5.903	4,32	4.331	3,24
México	3.900	2,72	3.900	2,75	3.916	2,67	4.327	2,93	4.563	3,34	4.001	2,99
Uganda	4.800	3,35	3.800	2,68	3.602	2,45	3.878	2,63	3.075	2,25	3.223	2,41
Guatemala	3.400	2,37	3.500	2,47	3.159	2,15	3.743	2,54	3.840	2,81	3.950	2,96
Peru	3.200	2,23	3.400	2,40	4.338	2,96	4.453	3,02	5.373	3,93	4.069	3,04
Costa do Marfim	1.800	1,26	2.175	1,53	1.923	1,31	2.046	1,39	1.886	1,38	982	0,73
Nicaragua	2.000	1,39	2.000	1,41	2.017	1,37	1.890	1,28	2.193	1,61	1.634	1,22
Costa Rica	1.508	1,05	1.508	1,06	1.444	0,98	1.571	1,06	1.462	1,07	1.392	1,04
El Salvador	680	0,47	680	0,48	537	0,37	1.235	0,84	1.152	0,84	1.814	1,36
	134.488		132.851		137.549		137.691		126.090		123.371	
Outros países	8.912	6,21	8.999	6,34	9.196	6,27	9.871	6,69	10.493	7,68	10.260	7,68
TOTAL	143.400	100,00	141.850	100,00	146.745	100,00	147.562	100,00	136.583	100,00	133.631	100,00

Fonte: MAPA/SPAE/CONAB, OIC (2016)

2.3.2 Processo de produção

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2016), as operações de pós-colheita do café envolvem diversas etapas até o armazenamento, que são importantes para a preservação das características sensoriais e de segurança, não diferindo das etapas da produção convencional.

Na Figura 19 e Figura 20 vê-se um esquema do processo de produção do café antes da colheita e após a colheita, respectivamente.

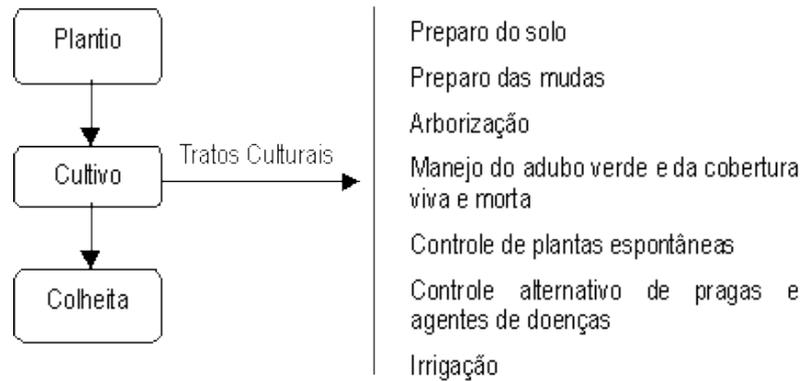


Figura 19 - Etapas pré-colheita.

Fonte: Embrapa, 2016

Na Figura 20 apresenta-se o fluxograma do processo de produção pós colheita.

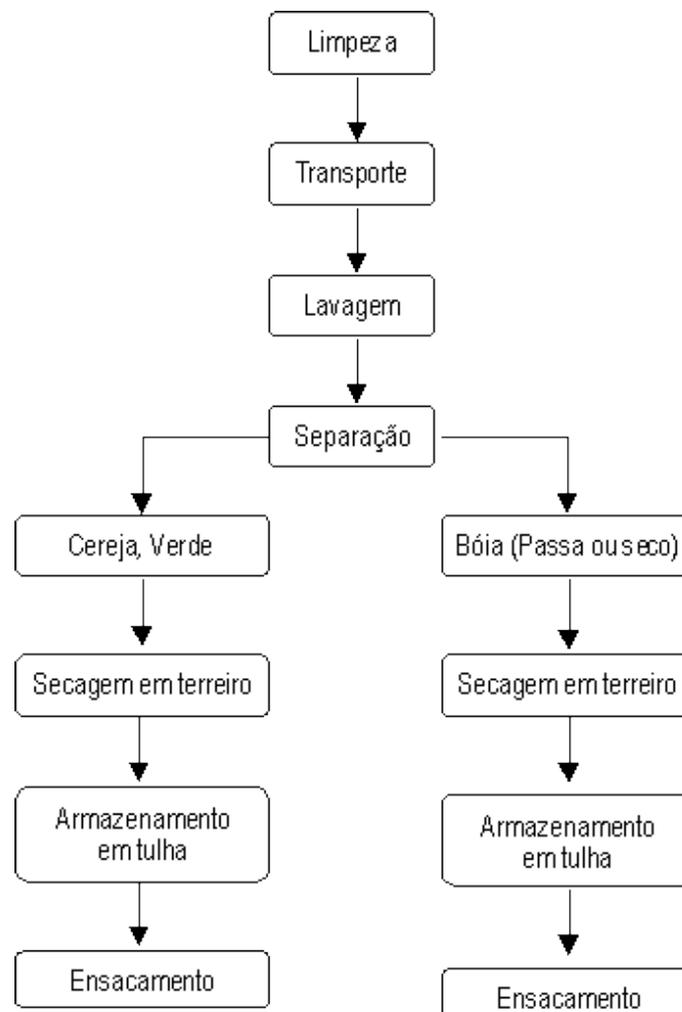


Figura 20 - Etapas pós – colheita.

Fonte: Embrapa, 2016

De acordo com a Figura 20, após a colheita, o café deve ser transportado para o local de processamento o mais rapidamente possível, evitando-se que fique amontoado na área de

produção enquanto aguarda o transporte. Recomenda-se nunca estocar o café colhido por períodos prolongados, seja nas carretas ou principalmente em sacos, para minimizar o problema de fermentação que é obviamente mais intensa quanto maior for a umidade dos frutos.

Tanto por derriça manual no pano ou mecanizada, o café deve ser submetido ao processo de limpeza e separação das impurezas, que pode ser feito por peneiramento manual (abanação), ventilação forçada ou por separadores de ar e peneira (máquinas de pré-limpeza).

O café pode ser processado por via seca ou por via úmida conforme fluxograma apresentado na Figura 20. O preparo via úmida dá origem aos cafés despulpados ou desmucilados através do processo de fermentação rápida ou desmucilagem. O despulpamento consiste na retirada da casca dos frutos maduros ou cerejas por meio de um descascador mecânico e posterior fermentação e lavagem dos grãos, eliminando-se a mucilagem. É uma prática comum entre os produtores do México, da Colômbia e do Quênia, mas no Brasil o despulpamento é pouco utilizado. É indicado para áreas onde o período pós-colheita ocorre sob condições de elevada umidade relativa do ar. Neste caso, a retirada da mucilagem, através da operação de despulpamento, reduz os riscos de desenvolvimento de microrganismos associados aos frutos, responsáveis por fermentações indesejáveis. Além deste fato, o café despulpado e o cereja descascado apresentam a vantagem de diminuir consideravelmente a área de terreiro e o tempo necessário para secagem (um terço do tempo gasto em relação ao café integral). Nas fases posteriores do preparo, reduz-se em até 60% o volume necessário de secadores, silos e tulhas (EMBRAPA, 2016).

No processamento via seca os grãos de café, após a abanação, lavagem e separação das frações (cereja, verde e bóia) são encaminhados para a secagem em terreiro ou para secadores artificiais. Esse tipo de processamento, também pode ser conduzido com prévio descascamento dos cafés cereja e verde, porém mantendo-se a mucilagem que envolve o grão. Os grãos descascados ("cereja" descascado) são então encaminhados para secagem (EMBRAPA, 2016).

Mesmo com a retirada das impurezas (gravetos, terra, pedras, folhas, etc.), o café deve passar pelo lavador ou separador hidráulico que promove a separação de acordo com o estágio de maturação dos frutos que apresentam diferentes densidades. Frutos com graus diferentes de maturação se mantidos juntos, resultam em bebida de qualidade inferior.

A lavagem deve ocorrer no mesmo dia da colheita e o café lavado não deve ser amontoado, seguindo imediatamente para o local de secagem. Na lavagem ou separação hidráulica há uma parte que flutua, conhecida pelo nome de café bóia, representada pelo grão

que secou na planta, café-passa, frutos verdes, mal granados ou leitosos. A fração que submerge é composta de frutos maduros e de meia maturação, constituindo um café de maior valor agregado. Por isso, as duas parcelas resultantes da separação hidráulica (cerejas e bóias) devem ser secas e armazenadas separadamente (EMBRAPA, 2016).

A secagem é uma operação de grande importância, tanto no aspecto de segurança, como no de qualidade do café. A secagem do café é comparativamente mais difícil de ser executada do que a de outros produtos. Além do elevado teor de açúcares presentes na mucilagem, os frutos normalmente apresentam teores iniciais relativamente altos de umidade.

A secagem pode ser feita em terreiros ou utilizando-se secadores mecânicos. Por vezes, efetua-se uma pré-secagem no terreiro, completando-se o processo em secadores mecânicos.

2.3.3 Aspectos gerais de equipamentos

A produção de café, para fins comerciais exige que se tenha uma produção suficiente para se pagar o custo de produção dele. Os processos de lavagem, despulpamento, secagem e beneficiamento do café consomem energia, a qual é gasta em apenas uma época do ano, ou seja, na colheita em sua maior parte. Por isso é possível se fazer um sistema de tarifação para o pré-processamento de café.

2.3.3.1 Lavador

Após a colheita por derriça no chão, no pano ou por processos mecânicos, o café deve ser conduzido, no mesmo dia, para secagem, passando antes pela limpeza, que geralmente é feita por meio de lavadores.

A lavagem é uma operação importante, tanto para o preparo por via úmida, quanto por via seca, visando a: separação por densidade e pré-limpeza.

O lavador é uma das estruturas mais importantes na fase de preparo do café, uma vez que proporciona a separação, não só das impurezas, como também dos frutos, nos seus diferentes estágios de maturação. Consta, basicamente, de um tanque de alvenaria ou chapa de aço galvanizado com bicas, comportas e artefatos mecânicos para retirada de impurezas. A separação dos frutos é feita pela densidade que caracteriza os diferentes estágios (ANDRADE, FILHO e VIEIRA, 2000).

A separação dos frutos é feita pela densidade, dependendo dos diferentes estágios de desenvolvimento, i. e., ou dos diferentes teores de umidade (verdes 60 a 70%, cereja 45 a 55%,

passa 30 a 40% e coco 20 a 30%). Assim, a fração constituída pelos frutos verdes e cereja afunda na água, saindo por uma bica do lavador, recebendo simplesmente a denominação de “cereja”. A outra fração, constituída por frutos, passa e seco, que são mais leves e não afundam, recebe a denominação de “bóia”, e sai por outra bica. Por apresentarem tempos de secagem diferentes, estas duas frações deverão ser secadas, separadamente, para que se obtenha um produto final mais uniforme e de melhor qualidade (ANDRADE, FILHO e VIEIRA, 2000).

Segundo Andrade et al. (2000), o consumo médio de energia elétrica por saca de 60 kg beneficiada no lavador mecânico é de 0,35 kWh. Portanto, o consumo de energia elétrica no lavador (CE_l) por safra pode ser calculado como:

$$CE_l = QS.0,35 \quad (16)$$

onde QS é a quantidade de sacas na safra.

2.3.3.2 Despoldadores

Despoldadores são equipamentos que agem por pressão e possuem dispositivos para separar os frutos maduros dos verdes, uma vez que esta parcela faz parte do café cereja (separado no lavador). O despoldador consiste na retirada da casca do fruto maduro ou cereja, para posterior fermentação e retirada da mucilagem (degomagem) por lavagem (ANDRADE, FILHO e VIEIRA, 2000).

Segundo Andrade et al. (2000), o consumo médio de energia elétrica por saca de 60 kg beneficiada no despoldador é de 0,85 kWh. Portanto, o consumo de energia elétrica no despoldador (CE_d) por safra pode ser calculado como:

$$CE_d = QS.0,85 \quad (17)$$

2.3.3.3 Secadores

A secagem de produtos agrícolas é uma operação que tem por objetivo a retirada de água em um nível que propicie condições adequadas para o beneficiamento, armazenagem e comercialização. A adoção generalizada da secagem para conservação de produtos deve-se a fatores como o menor custo e a facilidade de execução (ANDRADE, FILHO e VIEIRA, 2000).

A secagem é a etapa do processamento do café que consome a maior quantidade de energia. O Brasil é o maior produtor mundial de café, e com isso se deve prezar para que o processo de secagem seja o mais racional possível. No Brasil, o café é colhido, quando a percentagem de frutos verdes é inferior a cerca de 10%, ou seja, o café é colhido com maturação fisiológica heterogênea dos frutos. O teor de umidade dos frutos também se apresenta heterogêneo e a sua homogeneização somente é conseguida com secagem lenta ou parcelada. A secagem do café é uma das mais importantes operações no processamento. Se ela for malconduzida, poderá acarretar grandes prejuízos ao cafeicultor (ANDRADE, FILHO e VIEIRA, 2000).

O custo da energia utilizada na secagem de café depende, principalmente, da temperatura de secagem, do fluxo de ar, do tempo de secagem e do preço dos energéticos. Como o café é um dos produtos agrícolas que requer grande tempo de secagem em virtude de seu elevado teor de umidade inicial, o consumo de energia, nesse processo, por unidade de produto seco é elevado. Demanda cerca de aproximadamente 80% do total gasto de no pré-processamento (ANDRADE, FILHO e VIEIRA, 2000).

Os teores de umidade inicial e final do material que se deseja secar influenciam no consumo de energia. Os grãos de café têm teores de umidades iniciais bem altos, na faixa de 40 a 45% de umidade. Segundo Foelkel (2016), os cálculos da secagem de grãos de café são:

- Cálculo da quantidade de água a evaporar ($m_{a,e}$).

$$m_{g,s} = m_t \%_{s,g} \quad (18)$$

$$m_{i,a} = m_t - m_{g,s} \quad (19)$$

$$m_{f,a} = \frac{m_t}{\%_{g,s}} - m_t \quad (20)$$

$$m_{a,e} = m_{i,a} - m_{f,a} \quad (21)$$

onde m_t é a massa úmidos de grãos para secagem, $\%_{s,g}$ é a consistência ou percentual seco dos grãos, $m_{g,s}$ é a massa absolutamente seca de grãos, $m_{i,a}$ é a massa inicial da água presente nos grãos, $\%_{g,s}$ é a consistência ou percentual seco dos grãos após secagem, $m_{f,a}$ é a massa final da água nos grãos após secagem.

- Cálculo da quantidade de calor para aquecer e evaporar cada tonelada.

Dados:

Temperatura inicial da água = 30°C

Entalpia da água a evaporar dos grãos = 30 Mcal/t

Entalpia do vapor produzido pela evaporação da água = 610 Mcal/t

$$Q_{\text{calor evaporar água}} = \Delta \text{Entalpia} = (\text{Entalpia vapor}) - (\text{Entalpia água})$$

$$Q_{\text{calor evaporar água}} = (610) - (30) = 580 \text{ Mcal/t} \quad (22)$$

- Cálculo da quantidade de calor para aquecer e evaporar toda massa de água.

$$Q_{\text{calor evaporar } t \text{ água}} = (m_{a,e}) \cdot (580 \text{ Mcal/t}) \quad (23)$$

- Cálculo da quantidade de calor a ser oferecida pelos gases quentes que entram nos secadores.

$$Q_{\text{calor entra nos secadores}} = Q_{\text{calor evaporar } t \text{ água}} / \eta_{\text{sec}} \quad (24)$$

onde: η_{sec} é a eficiência do secador

2.3.3.4 Beneficiadora

O beneficiamento do café envolve diferentes etapas, como máquina de beneficiar ou descascador, separadoras densimétricas e catador eletrônico de café.

A máquina de beneficiar ou descascador além de limpar, descasca e pode ainda classificar o café em escolha boa e bica corrida. Constitui-se de uma peneira de pré-limpeza conjugada com um catador de pedras, um cilindro descascador e peneiras onde são separadas as cascas, cafés brocados, conchas, café miúdos e não descascados. Completam a máquina um aspirador, um soprador e elevadores de canecos (ANDRADE, FILHO e VIEIRA, 2000).

As separadoras densimétricas, também chamadas de mesa de gravidade, promovem a separação dos grãos em camadas de pesos específicos diferentes por meio da flutuação dos mesmos em um colchão de ar criado por ventiladores, sobre um tabuleiro. O movimento de vibração do tabuleiro, combinado com as inclinações longitudinal e lateral reguláveis transforma as camadas em faixas ordenadas de diferentes pesos específicos, que são desviadas para cada bica coletora, de acordo com a conveniência técnica e comercial da seleção (ANDRADE, FILHO e VIEIRA, 2000).

Os catadores eletrônicos de café são destinados a separar os grãos de café pela cor, dando uniformidade aos lotes. Esta operação é a última a ser executada, depois de eliminados os defeitos e classificado por peneira. Essa máquina se baseia no uso de células fotoelétricas e separa os grãos por jatos de ar comandados pelas células. Essa operação é rápida e a produtividade do equipamento é relativamente elevada (ANDRADE, FILHO e VIEIRA, 2000).

Segundo Andrade et al. (2000), o consumo médio de energia elétrica por saca de 60 kg beneficiada no processo de beneficiamento é de 1,26 kWh. Portanto, o consumo de energia elétrica no processo de beneficiamento (CE_b) por safra pode ser calculado como:

$$CE_b = QS. 1,26 \quad (25)$$

2.3.4 Projeções futuras do mercado cafeeiro

Estimativas para 2016 indicam uma safra de 50,5 milhões de sacas de 60 kg, valor superior à safra de 2015, cuja produção foi de 43,2 milhões de sacas (MAPA, 2016). A Tabela 5 mostra as estimativas da safra de café de 2016.

Tabela 5 - Estimativas da safra de café de 2016

Café	Safra 2016 (milhões sacas de 60kg)	%
Produção Nacional	51	100,0
Principais estados produtores		
Minas Geras	28	54,9
Espírito Santo	11	22,1
São Paulo	5	9,8
Total	44	86,8

Fonte: MAPA, 2016

Da produção total, 54,9% são produzidos em Minas Gerais, 22,1% em Espírito Santo, e 9,8% em São Paulo. Estes são os maiores produtores do país. Na safra de 2016, 38,8 milhões de sacas foram de café arábica e 11,7 milhões de Conilon. O primeiro é produzido em Minas Gerais e o outro em Espírito Santo, predominantemente (MAPA, 2016).

As projeções mostram que a produção em 2025/26 deve situar-se entre 65 e 85 milhões de sacas. Essa produção deve ser obtida a uma taxa de crescimento anual de 2,7%.

Tabela 6 - Produção, consumo e exportação de café (milhões saca de 60kg)

Ano	Produção		Consumo		Exportação	
	Projeção	Limite superior.	Projeção	Limite superior.	Projeção	Limite superior.
2015/16	51	-	21	-	37	42
2016/17	50	59	21	22	38	44
2017/18	54	64	22	23	40	46
2018/19	52	66	22	23	40	47
2019/20	56	70	23	24	41	49
2020/21	56	72	23	25	42	51
2021/22	59	76	24	25	43	52
2022/23	60	77	24	26	44	53
2023/24	62	80	25	27	45	55
2024/25	63	82	25	27	46	56
2025/26	65	85	26	28	47	57

Legenda: MAPA, 2016

Comparando as estimativas da safra de 2015/16 e 2025/26 da Tabela 6, têm-se que a produção crescerá 29,1% no final do período da avaliação.

Os últimos levantamentos apontam um aumento do consumo nos últimos anos, tendência que não deve ser invertida. Isto se faz necessário com uma melhor estruturação do setor. O avanço deve começar no campo, onde a preferência pela qualidade pode nortear a produção, da plantação à colheita. O interesse de parte do mercado por um grão de maior qualidade exige que a planta e seus frutos sejam saudáveis e produtivos, sendo preciso maior esforço dos produtores neste sentido. Haverá necessidade de melhoria tecnológica, a qual minimizaria a queda da produção em anos com clima desfavorável, além de elevar naturalmente os volumes alcançados (SEBRAE, 2011).

O mercado para os diversos tipos de café mostra-se interessante, mas também exigente. A competitividade existe no Brasil e em outros países, apesar do mercado externo ainda ser pouco explorado pelas pequenas empresas. Algumas alternativas para se diferenciar no mercado incluem as certificações já existentes, onde são exploradas características da produção

e suas relações com princípios de qualidade, tradição, sustentabilidade e comércio justo, entre outros (SEBRAE, 2011).

Após esses levantamentos, é possível concluir que o mercado deve continuar aquecido, podendo ser ainda mais consolidado com o direcionamento de esforços voltados para a manutenção da força mercadológica do produto, alinhando a isto o foco na qualidade como diferencial.

2.4 Casca de café

2.4.1 A biomassa

A fonte de energia da biomassa cresce consideravelmente no mundo por várias razões. Primeiramente, devido ao grande crescimento demográfico nos países em desenvolvimento; em segundo, o aumento da utilização, em partes por causa de questões ambientais, nos países industrializados; e, em terceiro lugar, por conta das tecnologias desenvolvidas atualmente, que permitirão a produção de novos combustíveis e aperfeiçoamento dos já existentes ou da conversão de biocombustíveis em vetores energéticos mais eficientes, estimulando, também, a demanda por matéria prima (CALLE, BAJAY e ROTHMAN , 2008).

A biomassa, portanto, merece atenção especial porque, a curto e médio prazo, oferece alternativas mais promissoras aos combustíveis líquidos à base de petróleo no setor do transporte, bem como o fornecimento de energia para as zonas rurais, melhorando ou substituindo métodos tradicionais de utilização de energia de biomassa com consequentes benéficos para a saúde humana e para a preservação da natureza (BRAND, 2010).

No Brasil, a imensa superfície do território nacional, quase todas localizadas em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para a produção e uso energético da biomassa em larga escala. Além da produção de álcool, queima em fornos, caldeiras e outros usos não comerciais, a biomassa apresenta grande potencial no setor de geração de energia elétrica (ANEEL, 2002).

A principal fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos. Eles são gerados em todo o mundo como um grande recurso para obtenção de energia apenas sob adequada exploração (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

Os resíduos vegetais são produzidos no campo, resultantes das atividades da colheita dos produtos agrícolas. O Brasil é um grande produtor agrícola, e nos últimos anos a área plantada e a produção agrícola tiveram um crescimento importante (ANEEL, 2002).

A partir dos dados apresentados na Tabela 7 é possível inferir que, na atividade agrícola, o Brasil é um grande produtor de cana-de-açúcar, mas também outras culturas importantes, como a de arroz, mandioca, soja e café, podem e são aproveitadas energeticamente, como é o caso da casca de café.

Tabela 7 - Alguns produtos agrícolas e seus resíduos, em 2004.

Matéria-prima/ resíduo	Produção agrícola (t)	Produção total de resíduos (t)
Cana (bagaço)	396.012.158	59.401.824
Soja (grãos vc. Restos de cultura)	51.919.440	80.746.824
Milho (palha e sabugo)	48.327.323	64.028.870
Mandioca (rama)	21.961.082	6.542.206
Arroz (casca)	10.334.603	2.937.094
Café (casca)	12.454.470	1.662.658

Fonte: Adaptado de Cortez et al., 2008

Esses dados mostram que o Brasil possui um grande potencial interno na geração de energia elétrica a partir da biomassa e que para esse crescimento em expansão continue e melhore o uso, é preciso que, além do avanço tecnológico, sejam desenvolvidos modelos de gestão que garantam a sustentabilidade técnica, econômica e ambiental dessa fonte energética (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

O café é um produto extremamente importante para a economia nacional, com uma produção estimada em cerca de 30 milhões de toneladas por ano, além de contribuir com aproximadamente 32% do mercado internacional. Durante o processamento do café em coco, gera-se cerca de 50% de casca e na maioria das vezes são descartadas de forma inadequada. Dessa forma, torna-se necessário buscar soluções viáveis para o seu reaproveitamento. A casca

do café apresenta características desejáveis para uma possível aplicação energética, já que seu poder calorífico é próximo ao do bagaço da cana (COMÉRIO, KAFLEK, *et al.*, 2016).

Segundo Vale (2007), a casca do café, assim como outras biomassas, pode gerar eletricidade em termoelétricas, a partir da combustão em fornalhas, gerando energia na forma de calor, utilizado para a produção de vapor, que por sua vez é usado para a geração de energia elétrica no sistema de cogeração.

2.4.1.1 Fatores críticos para a biomassa

Quando se opta por um sistema de processamento e queima da biomassa, devem ser considerados diversos fatores que podem impedir a viabilidade e sustentabilidade do empreendimento, discutidos a seguir.

Marbe *et al.* (2004) destaca os parâmetros identificados como de maior importância econômica para as centrais de cogeração a biomassa: (i) o tempo anual de operação, (ii) a quantidade de calor gerado, (iii) o preço do combustível, (iv) o valor de créditos de carbono e (v) o aspecto financeiro para o retorno do capital investido. Apenas o item (v) não foi levado em consideração no desenvolvimento deste trabalho.

A biomassa apresenta características que devem ser consideradas na sua utilização:

- Baixa densidade: A densidade de resíduos vegetais, por exemplo, pode variar de 150 a 500 kg/m³. (GOEHRS, 1984). Conforme Nogueira (2003), a baixa densidade de resíduos agrícolas faz com que o transporte a longas distâncias e armazenamento aumente de forma considerável o seu custo. Uma alternativa é se prensar a biomassa, produzindo “pellets” ou “briquetes” passando a densidade para uma faixa de 1.000 a 1.300 kg/m³;

- Baixo poder calorífico: O poder calorífico é fortemente dependente da umidade. Para a lenha com 50% e 17% de umidade (em base úmida), o poder calorífico é de 8,2 MJ/kg e 15,2 MJ/kg, respectivamente;

- Altos teores de umidade: Conforme Savola (2006) deve-se secar a biomassa quando a mesma possui acima de 55% de umidade. Segundo Wimmerstedt (1999), para sistemas de cogeração de pequena escala (1 a 5 MW) a secagem da biomassa ocorre no próprio sistema de grelhas onde ocorre a combustão. Para se aumentar a eficiência das caldeiras existe uma tendência a se instalar sistemas de pré-aquecimento do ar de combustão, onde o mesmo passa por trocador de calor na saída dos gases de combustão, principalmente para a queima de biomassa;

- Manuseio: Dificuldade devido a sua grande variedade de forma e tamanho. (BRAND & NEVES, 2005);

- Logística: Para reduzir os custos a biomassa necessita estar disponível a uma pequena distância em relação ao local que será processada. Por exemplo, para uma central de cogeração de pequena escala (500 kWe a 2,0 MWe) se necessitam de 1000 a 5000 toneladas por ano de biomassa, que devem estar a um raio de 5 km (1 a 3% desta área de raio 5 km, deve produzir ou gerar biomassa). (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2007).

2.4.2 Caracterização da casca de café para geração de energia

Esta seção trata da definição das propriedades mais importantes para a geração de energia a partir da casca de café e de como elas podem qualificar de forma positiva ou negativa como combustível e como podem ser alteradas de forma a melhorar o desempenho em sistemas de geração de energia.

2.4.2.1 Composição química imediata

A composição química imediata de uma amostra se refere ao conteúdo percentual do carbono fixo (F), matérias voláteis (V), cinzas (A) e eventualmente umidade (W), baseado na massa do combustível.

Os voláteis têm um papel importante e expressa a facilidade de se queimar um material e se determina como a fração em massa do combustível que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850 °C, por 7 minutos. Logo após o aquecimento da amostra, a fração que permanece é chamada de carbono fixo ou coque (RENDEIRO & NOGUEIRA, 2008).

O teor de voláteis e carbono fixo são inversamente proporcionais. O índice de materiais voláteis é importante na combustão. Com exceção do carvão, todos os combustíveis sofrem evaporação da maior parte de seus componentes químicos antes de se queimarem. Após a volatilização destes constituintes, na forma gasosa, estes se misturam com o oxigênio do ar, promovendo reações de combustão (BRAND, 2010).

Pelo conhecimento do índice percentual de materiais voláteis, pode-se estimar o grau de combustão de um combustível. Ou seja, combustíveis com altos índices de carbono fixo (baixo índice de voláteis) deverão queimar-se mais lentamente e poderão requerer mais tempo de permanência na fornalha para queima total, quando comparados com combustíveis que possuem baixo índice de carbono fixo (BRAND, 2010).

O conhecimento da composição imediata é essencial para cálculos de projetos de fornalhas e das quantidades de ar primária e secundário, necessário em função da percentagem de voláteis.

Segundo Oliveira (2013), a análise imediata da casca do café é apresentado na Tabela 8:

Tabela 8 - Análise imediata da casca de café

Combustível	Material Volátil [%] b.s	Umidade [%]b.s	Teor de cinzas [%]b.s	Carbono fixo [%]b.s
Casca de café	78,5	10	2,4	19,1

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2013

2.4.2.2 Composição química elementar

A composição química elementar de uma amostra corresponde ao conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem, geralmente referido à matéria seca, ou seja, sem considerar a presença de água. São apresentados valores para o carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N) e materiais residuais (cinzas) (A). Esta última parcela agrega todos os elementos que não são relevantes nas reações de combustão como o potássio, fósforo e o cálcio (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

É a característica técnica mais importante do combustível e constitui a base para análise dos processos de combustão, tais como cálculos dos volumes do ar, gases e entalpia, determinando o poder calorífico do combustível.

De acordo com Oliveira (2013) a composição química elementar da casca de café é apresentada na Tabela 9:

Tabela 9 - Análise elementar da casca de café

Análise elementar (% em massa)	Elementos				
	C	H	O	N	S
Casca de Café	43,3	5,28	40	2,04	0,24

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2013

2.4.2.3 Umidade

Teor de umidade pode ser definido como a massa de água contida na biomassa e pode ser expressa tanto na base úmida (bu) quanto na base seca (bs), qual pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Segundo McKendry (2002) duas formas de teor de umidade são de interesse, a umidade intrínseca (teor de umidade do material sem a influência de efeitos climáticos) e a umidade extrínseca (a influência das condições meteorológicas prevalecentes durante a colheita da biomassa).

O teor de umidade presente na Biomassa pode interferir em outras propriedades, como o Poder Calorífico Inferior (PCI) que está intimamente ligado, pois este decresce com o aumento da umidade. A condutividade elétrica é outro fator que depende do teor de umidade (NOGUEIRA, 2007 e CALEGARI et al, 2005).

Biomassa originária de produção agrícola possui teor de umidade entre 15–30% bu (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

2.4.2.4 Densidade relativa

A densidade é uma das principais características para escolha da biomassa para geração de energia, pois ela define a logística a ser tratada: o transporte e o armazenamento (NOGUEIRA, 2007).

Define-se densidade relativa como a razão entre a massa específica da biomassa pela massa específica da água (pH₂O) na condição padrão (4°C e 100 kPa), ou seja, 1000 kg/m³ (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

2.4.2.5 Poder calorífico

Segundo Quirino (2011), o poder calorífico é a quantidade de calor liberada por um material em sua combustão completa. Ainda para Nogueira (2003), quando ocorre combustão completa de uma unidade de combustível este libera energia térmica e é geralmente medido em termos da energia por conteúdo por unidade de massa ou volume, daí MJ/kg (sólidos), a MJ/l para líquidos e por fim para gases para MJ/Nm³. De uma maneira geral, essa propriedade depende da composição da biomassa e do seu grau de umidade.

O Poder Calorífico pode ser dividido em Superior e Inferior:

- a) Poder Calorífico Superior (PCS): Segundo Nogueira (2007) e Van Wylen (1995) apud Klautau (2008), PCS representa o calor liberado, ou seja, a quantidade máxima de energia que pode ser obtida da transferência de calor do combustível. O PCS pode ser obtido de duas maneiras: Por Bomba Calorimétrica, que consiste em colocar —nI quantidade de biomassa dentro de uma bomba calorimétrica seguindo os procedimentos ditados pela NBR 8633 (Carvão Vegetal Determinação do Poder Calorífico), qual dará o valor do PCS, ou pela Análise Elementar, pois através da mesma é possível relacionar do PCS de uma biomassa com a quantidade de ligações químicas envolvendo seus elementos. Conhecendo-se a fração mássica dos componentes da biomassa, então consequentemente é possível calcular o PCS.
- b) Poder Calorífico Inferior (PCI): Calegari et al. (2005) e Van Wylen (1995) apud Klautau (2008) apontam o PCI como a quantidade de calor liberado durante a combustão sendo que a água está no estado de vapor. O PCI é calculado a partir do PCS, porém considerando o teor de umidade que está presente no combustível, ou seja, corresponde a quantidade de calor útil para acontecer a queima da biomassa esta análise retrata melhor a qualidade do combustível.

Segundo Vieira (2012), tanto o Poder Calorífico Superior (PCS) ou Inferior (PCI) de uma determinada biomassa é a propriedade físico-química mais importante a considerar para a escolha de um processo termoquímico.

Sabendo a composição elementar de um combustível é possível calcular o poder calorífico inferior do combustível (*PCI*) pela fórmula empírica de D.I. Mendeleev, que pode ser escrita como (VLASSOV, 2008):

$$PCI = 339,13C + 1029,95H - 108,85(O - S) - 25,12W [kJ/kg] \quad (26)$$

onde *C*, *H*, *O*, *S* e *W* são porcentagens de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre e umidade do combustível correspondentemente.

2.4.2.6 Teor das cinzas

Cinzas são resíduos da combustão, compostas por óxidos que se apresentam normalmente no estado sólido à temperatura ambiente. Como a combustão se processa a elevada temperatura, é necessário o conhecimento do comportamento das cinzas nessas condições para evitar inconvenientes provocados por operações inadequadas e orientar a

escolha dos materiais refratários com características compatíveis com as condições existentes no interior da câmara de combustão (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

A cinza no combustível pode ter diversas origens como:

- a) Elementos metálicos e semi-metais ou metalóides, presentes na estrutura molecular do combustível, devido à sua própria formação;
- b) Fragmentos de argila, areia, sais, pirita, etc., agregados à biomassa;
- c) Fragmentos do solo misturados à biomassa na colheita e/ou manuseio.

As propriedades de interesse determinadas em análises laboratoriais são composição química e fusibilidade da cinza.

A composição química das cinzas permite avaliar o seu comportamento quanto aos seguintes aspectos:

- Ataque de refratários: o ataque químico das cinzas aos refratários pode ser evitado ao escolher refratários com comportamento químico semelhante ao das cinzas. Os óxidos de elementos metálicos são básicos; os óxidos de semi-metais são geralmente ácidos, tais como óxidos de silício, zircônio e titânio; excepcionalmente, alguns óxidos são neutros, como o óxido de alumínio.

Os materiais refratários que entram em contato com as cinzas devem ter baixa porosidade, pois as cinzas alojadas nos poros, ao se dilatarem, provocam rachaduras nas superfícies dos mesmos.

- Amolecimento e fusão das cinzas: o ensaio de fusibilidade determina a temperatura inicial e final de amolecimento da cinza. Observa-se uma influência acentuada do óxido de ferro na fusibilidade da cinza em atmosfera gasosa redutora, com sensível abaixamento da temperatura de amolecimento em relação à atmosfera oxidante.

É possível estimar a temperatura inicial e final de amolecimento da cinza através da sua composição química, através de expressões empíricas desenvolvidas por vários autores, algumas das quais podem ser vistas em (SANTOS, 2004) e (PHILLIPS, 2003). Os processos de combustão com temperaturas superiores ao ponto de amolecimento da cinza podem propiciar a aglomeração de material particulado denominado “*sinter*”, ou a fusão da cinza “*slagging*”, que geralmente inviabilizam a continuidade do processo ou reduzem a eficiência da troca de calor no equipamento.

- Sublimação de compostos: os óxidos alcalinos Na_2O e K_2O , diferem dos demais óxidos, pois uma boa parte dos mesmos se volatiliza durante a combustão, e condensa-se em temperaturas em torno de 760°C ; ao condensar-se nas superfícies mais frias do equipamento aglutinam as cinzas volantes, propiciando corrosão e redução da taxa de transferência de calor nestas superfícies.

2.4.3 Formas de obtenção de energia a partir da biomassa agroindustrial

Segundo Vlassov (2001), combustível é toda substância capaz de reagir com oxigênio e de liberar energia térmica. Uma substância para ser usada como combustível deve estar presente na natureza, possuir uma quantidade de calor suficiente na queima e ser economicamente de baixo valor.

Considerando as formas de obtenção de energia a partir da biomassa, estas podem ser classificadas com base no aumento da complexidade e nível tecnológicos no processo. Assim, os processos podem ser classificados em combustão, pirólise ou carbonização, gaseificação e hidrólise, que resultam em energia térmica, elétrica e mecânica.

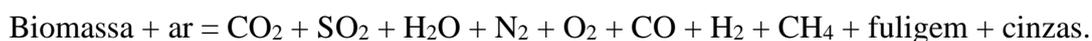
2.4.3.1 Combustão

Segundo (NOGUEIRA e LORA, 2003), a queima direta ou combustão é a tecnologia de conversão mais antiga e mais difundida comercialmente, aplicando-se fundamentalmente para a madeira e para os mais diversos resíduos agroindustriais como o bagaço de cana, a casca de arroz e outros similares como os resíduos do agronegócio da mamona. A biomassa é um combustível rico em voláteis, que constituem quase 75% de seu peso. Como exemplo dessa constituição pode-se citar o bagaço de cana que possui cerca de 73,78% de materiais voláteis. A combustão é um processo milenar e complexo, porém, de forma simplificada o seu mecanismo pode ser explicado através de seis etapas consecutivas e bem definidas:

- Secagem;
- Emissão de voláteis;
- Ignição dos voláteis;
- Queima dos voláteis em chama;
- Extinção da chama dos voláteis;
- Combustão do resíduo de carbono (coque).

Durante o processo de combustão da biomassa, deve-se levar em conta que este processo transcorre primeiramente em uma etapa homogênea (queima dos voláteis) e depois em uma

etapa heterogênea (combustão do resíduo de carbono ou coque). De acordo com as condições de fornecimento e mistura de ar ao combustível, geralmente a velocidade das fases iniciais é superior à da última fase, quando o combustível queima no estado sólido (NOGUEIRA e LORA, 2003). Resumidamente, a reação de combustão de um combustível com ar pode ser representada segundo o seguinte esquema:



No caso da biomassa, os produtos CO_2 , SO_2 e H_2O são resultantes da oxidação completa, sendo a quantidade de SO_2 quase desprezível. Os produtos N_2 e O_2 são provenientes do ar em excesso e eventualmente da umidade do combustível e do ar. Os produtos CO , H_2 e CH_4 e fuligem são resultantes de combustão incompleta. As cinzas são resultantes da fração mineral do combustível (NOGUEIRA e LORA, 2003).

2.4.3.2 Pirólise

Este termo engloba um conjunto de processos técnicos em ausência total ou quase total de oxigênio. O processo começa com a degradação dos principais componentes da biomassa: a hemicelulose começa a degradar-se entre 225°C e 325°C , a celulose entre 325°C e 375°C enquanto a lignina o faz entre 250°C e 500°C . As condições são ajustadas para favorecer a formação do produto desejado. Assim, para se obter a maior quantidade possível da fração sólida (carvão vegetal) se empregam temperaturas baixas da ordem de 400°C e tempos de reações grandes (de 15 minutos a vários dias). Para obtenção de altos rendimentos da fração líquida (até 85%) empregam-se temperaturas em torno de 500°C e tempos de residência pequenos, da ordem de segundos. Para maximizar o rendimento de gases (até 80%) trabalha-se a 700°C ou mais, com tempos de residência também da ordem de segundos (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

A fração gasosa é formada por hidrocarbonetos leves (metano, etileno, etano, propileno, propano, entre outros), óxidos de carbono (CO_2 e CO) e hidrogênio. A fração líquida é constituída por uma grande variedade de compostos de massa molecular intermediária. A fração sólida é formada por estruturas resultantes da condensação múltipla de ciclos aromáticos (carvões e coques) e pelos componentes inorgânicos que sempre estão presentes na biomassa (cinzas). As características e o tipo de produto obtido nos distintos processos podem ser afetados por muitos fatores, tais como: tempo de estada, tamanho da partícula da biomassa, conteúdo de umidade, pressão do processo e outros agentes como presença de água, oxigênio, dentre outros (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

Segundo (NOGUEIRA e LORA, 2003), a análise térmica, grupo de técnicas baseadas na medição da variação dos parâmetros que caracterizam alguma propriedade física de uma substância com a temperatura, constitui uma ferramenta muito útil para o estudo do processo de pirólise de materiais ligno-celulósicos.

2.4.3.3 Gaseificação

Também denominado pirólise catalítica. É um processo parecido com a pirólise, ou seja, um processo que se realiza a certa temperatura (mais ou menos elevada) em ausência de oxigênio onde se utilizam catalisadores para modificar os produtos obtidos. O uso de um catalisador adequado na gaseificação da biomassa permite um aumento da eficiência global do processo, devido ao que se requerem menores temperaturas de reação e se pode orientar a produção para algum tipo de produto específico, por exemplo, pode-se minimizar a produção das frações líquidas e sólidas mencionadas anteriormente (BUSSI et al, 2004).

De acordo com (NOGUEIRA e LORA, 2003), na gaseificação, a produção de calor não é o objetivo principal, mas sim a conversão da biomassa em um gás combustível, através de sua oxidação parcial a temperaturas elevadas. Este gás, conhecido como gás pobre ou producer gas, é um energético intermediário, e poderá ser empregado mais adiante em outro processo de conversão, a fim de gerar calor ou potência mecânica, adequando-se a sistemas em que a biomassa sólida não é possível de ser utilizada. Basicamente o conteúdo médio dos compostos combustíveis no gás resultante da biomassa é, para o CO entre 9 e 21%, para o H₂ entre 6 e 19% e para o CH₄ entre 3 e 7%.

Dentro de uma panorâmica do aproveitamento da biomassa residual, tanto real como potencial, a caracterização dos produtos é uma fase inicial importante em qualquer estudo sobre aproveitamento e servirá como ferramenta auxiliar em todos os trabalhos posteriores. O processo de caracterização da biomassa tem por objeto definir as características físicas, químicas e energéticas que permitam avaliar o comportamento e as possíveis linhas de utilização (LORA e NASCIMENTO, 2004).

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve as características do desenvolvimento da pesquisa, dando ênfase à sua natureza e tipo, aos materiais e métodos, às suas variáveis e indicadores, aos instrumentos de captação de dados, assim como a forma de organização destes.

3.1 Tipo de pesquisa

Segundo Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torna-lo mais explícito ou a construir hipóteses. Sendo assim, o trabalho em questão é classificado como exploratório uma vez que o resíduo de café, que normalmente é utilizado como adubo ou desperdiçado, pode se transformar em um potencial ganho na geração de energia térmica e elétricas em sistemas de cogeração para as empresas.

Richardson et al. (1989), afirmam que de forma ampla, pode-se classificar a pesquisa em dois grandes métodos: quantitativo e qualitativo.

De acordo com Lakatos & Marconi (2003), o método quantitativo pode ser definido como aquele que apresenta quantificações tanto na coleta de informações, quanto em seu tratamento por meio de técnicas estatísticas. Para, Richardson et al. (1999), o método quantitativo representa a intenção de garantir a precisão dos resultados, evitar distorções de análise, possibilitando, conseqüentemente, uma margem de segurança quanto as inferências.

Em contrapartida, Creswell (1998) afirma que para uma pesquisa qualitativa, devem ser coletados dados empíricos, como históricos de ocorrências, fatos e fotos em que são observados problemas relacionados à pesquisa, e estudos de casos de locais com a mesma ou semelhante realidade estudada. Desta forma, é possível ser feita uma análise dos fenômenos e do ambiente, possibilitando a interpretação dos problemas envolvidos.

Deste modo, a pesquisa em questão será conduzida de forma qualitativa, a partir de interpretação das análises de dados obtidos, e de forma quantitativa, pela coleta de informações e o tratamento por meio de técnicas estatísticas.

Além disto, para que tenha um melhor entendimento do assunto, torna-se necessário uma pesquisa bibliográfica, pois Ferrari (1982), afirma que este tipo de pesquisa tem por finalidade conhecer as contribuições científicas realizadas sobre determinado assunto. Portanto,

o trabalho é classificado como bibliográfico devido a necessidade de se ter um arcabouço teórico sobre o assunto de forma a auxiliar na solução do problema.

Por fim, outra classificação tomada para o trabalho é de pesquisa experimental, que é definido por Gerhardt e Silveira (2009), em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

3.2 Materiais e métodos

Para realizar este estudo é necessário seguir alguns procedimentos que auxiliarão no desenvolvimento dos resultados e discussões posteriores, de acordo com o fluxograma a baixo.

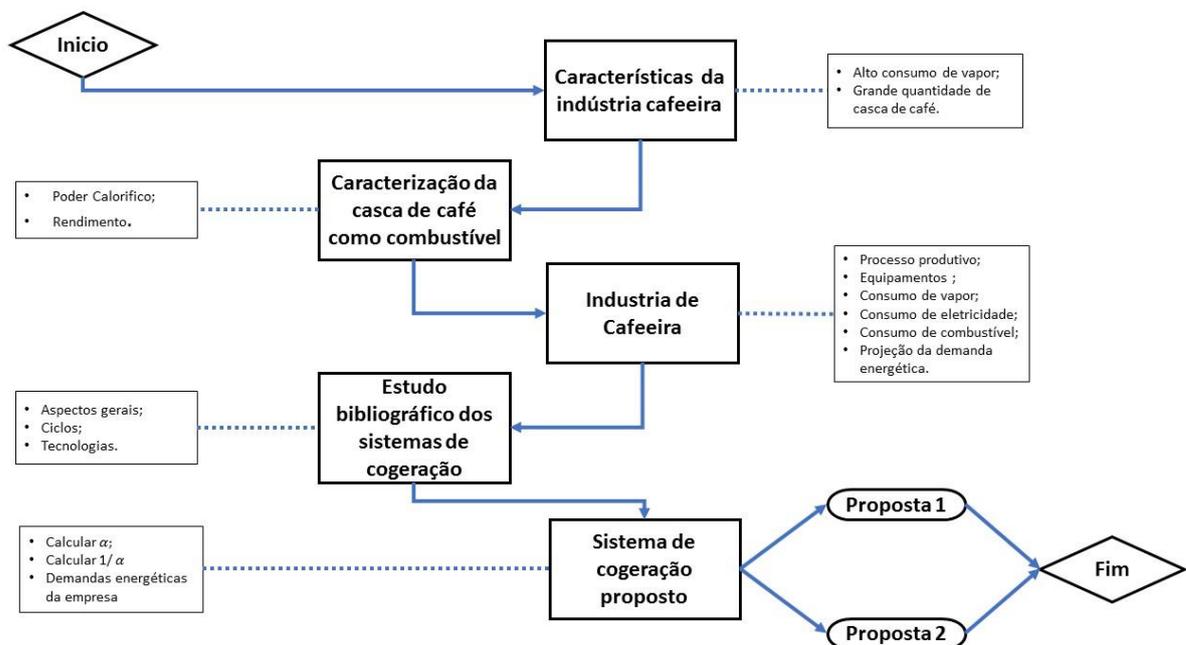


Figura 21- Fluxograma dos materiais e métodos.

Fonte: Pesquisa direta, 2017

Para o início do trabalho, foi realizado um estudo bibliográfico com o intuito de obter bases conceituais acerca de sistemas de cogeração e as características da indústria cafeeira, assim como os parâmetros e indicadores que envolvem as configurações destes ciclos aplicados às unidades de processo através da busca de artigos, teses, dissertações, livros entre outros materiais.

Escolheu-se uma empresa hipotética de café e os dados de acordo com a produtividade média nacional, retirados de fontes bibliográficas. A caracterização do objeto de estudo foi realizada através de análises do processo produtivo, desde a etapa inicial do processamento, até

a etapa final de processamento do café em sacas, assim como a quantidade de casca de café produzido, como de todo o parque de equipamentos da unidade, obtendo-se dados das demandas energética (térmica e eletromecânica), consumo de vapor e combustíveis.

Buscaram-se estudos e afirmativas que concretizassem projeções futuras do agronegócio de café que pudessem embasar um coeficiente multiplicador de parâmetros coletados da indústria cafeeira abordada neste trabalho, tendo como objetivo a proposição de um projeto que possa ser adequado com o cenário das décadas subsequentes.

Orientou-se segundo as características necessárias, as formulações aplicáveis, a partir dos princípios da termodinâmica, principalmente pela Primeira Lei da Termodinâmica e Segunda Lei da Termodinâmica, e dos conceitos e equações do ciclo Rankine, além de estar de acordo com os materiais obtidos para a elaboração da proposta de uma central de cogeração que melhor se enquadre nas necessidades energética, possuindo compatibilidade com o processo produtivo, a quantidade de combustível produzido pela casca de café e atendendo, portanto, a empresa em estudo.

Finalizou-se o trabalho com a seleção dos equipamentos disponíveis no mercado da central de cogeração proposta sendo realizado o embasamento destas escolhas a partir das análises de cada máquina térmica.

3.3 Variáveis e indicadores

Segundo Prodanov e Freitas (2013), considera-se variável como sendo “uma classificação ou medida; uma quantidade que varia; um conceito operacional que contém ou apresenta valores; aspectos, propriedade ou fator discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração”. As variáveis fazem referência as características do fenômeno a ser estudado e existem em todas as formas de pesquisa. Contudo, a maneira como são tratadas variam segundo o tipo de pesquisa: nas quantitativas elas são medidas, enquanto nas qualitativas, são descritas ou explicadas;

A Tabela 10 apresenta a variante pertinente a esta pesquisa e quais são seus respectivos indicadores.

Tabela 10 - Variáveis e indicadores

Variável	Indicadores
Casca de café	Quantidade de resíduo
Demanda energética	Consumo de vapor no processo; Consumo de combustível no processo; Consumo de eletricidade; Projeção em demanda energética.
ALFA (α)	Potência elétrica consumida no segmento; Potência térmica consumida no segmento.
Modo de operação do sistema de cogeração	Paridade térmica; Paridade elétrica; Despacho econômico.
Seleção dos ciclos de cogeração	1/alfa; Demandas energéticas da empresa; Processo produtivo; Temperatura desejada no processo produtivo; Vazão de vapor desejados; Pressão de vapor desejado no processo produtivo.
Eficiência térmica do ciclo de cogeração	Eletricidade produzida no ciclo; Calor do processo fornecido pelo ciclo; Energia gasta no ciclo.

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

3.4 Instrumento de coleta de dados

Coleta de dados relacionada ao projeto inicia-se por meio da obtenção de resíduo como fonte de combustível de geração de energia com suas propriedades energéticas.

Com esses dados são utilizadas formulações termodinâmicas para determinar o melhor sistema na conversão de energia e, posteriormente, o sistema proposto de cogeração.

3.5 Tabulação dos dados

Os dados fornecidos pela revisão bibliográfica do resíduo de café e tratados através de formulas termodinâmicas, foram dispostos em planilhas do software Microsoft Excel e do software Microsoft Word, estes foram analisados e simulados nos sistemas propostos de cogeração.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as ferramentas utilizadas para a concretização desta pesquisa, cujos instrumentos escolhidos, estão de acordo com o objeto proposto na mesma.

No capítulo seguinte, serão apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos, assim como as discussões frente a problemática e soluções.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização do empreendimento

As características da indústria hipotética estudada, como capacidade de processamento de café e casca de café, demanda energética e vazão de vapor, foram retiradas de fontes bibliográficas.

Com base nos dados do Conselho Nacional do Café (CNC, 2017), na safra de 2014/2015, a média nacional de produção mecanizada de café ocorreu em 121 hectares, sendo ela de 40 sacas de café por hectare. Portanto, obtêm-se um valor médio anual em torno 290 toneladas de café processado ou 4840 sacas, já que uma saca tem 60 quilos. Uma safra de café tem duração média de 4 meses. Neste trabalho, para os cálculos das demandas energéticas será utilizado o valor de produção do café de 290 toneladas por safra.

A produção de café processado engloba equipamentos que demandam energia, sendo térmica nos secadores e elétrica no lavador, despulpadores e processo de beneficiamento.

Para o cálculo da demanda térmica nos secadores na safra da indústria estudada, utilizou-se as equações 18 a 24. Considerando o teor de umidade inicial dos grãos de café de 45%, a umidade final dos grãos de 12%, o rendimento do secador de 75% e todo funcionamento em 4 meses (1 mês = 30 dias), tem-se que a demanda média térmica para os secadores é de 41,35 kW.

Para o cálculo da demanda elétrica no lavador, despulpadores e processo de beneficiamento na safra da indústria estudada, utilizou-se as equações 16, 17 e 25. Considerando todo funcionamento em 4 meses (1 mês = 30 dias), tem-se a demanda de energia elétrico médio para os equipamentos é de 4,134 kW.

A partir dos dados apresentados anteriormente, define-se resumidamente na Tabela 11 as necessidades energéticas e outros parâmetros de relevância, α e $1/\alpha$, que caracterizam o cenário atual da indústria em estudo. Entretanto, como mostrado nas perspectivas do setor cafeeiro, é considerado a taxa de crescimento de 2,7% ao ano e, desta forma, estabeleceu-se para efeitos de cálculos o crescimento das demandas energéticas do setor em 29,1% até o ano de 2026, sendo este o coeficiente multiplicador dos parâmetros envolvidos e que caracteriza o cenário futuro.

Tabela 11 - Parâmetros de caracterização das necessidades da indústria cafeeira

Parâmetros		Cenário	
		Atual	Futuro
Demanda de Energia	Elétrica	4,134	5,337
	Térmica	41,350	53,383
α [kWe/kWt]		0,10	0,10
$1/\alpha$ [kWt/kWe]		10	10

Fonte: Pesquisa direta, 2017

Como exibido na Tabela 11 o $1/\alpha$, calculado a partir da equação 14, possui um valor de 10 kWt/kWe e, de acordo com a Tabela 2, pode-se definir uma turbina a vapor de contrapressão ou uma turbina a vapor de extração-condensação para o sistema de cogeração que atenda as demandas energéticas da indústria cafeeira.

4.2 Sistema de cogeração proposto

O esquema demonstrado na Figura 22 consiste na central de cogeração proposta para o suprimento das demandas energéticas na condição futura, até o ano de 2026, na indústria cafeeira.

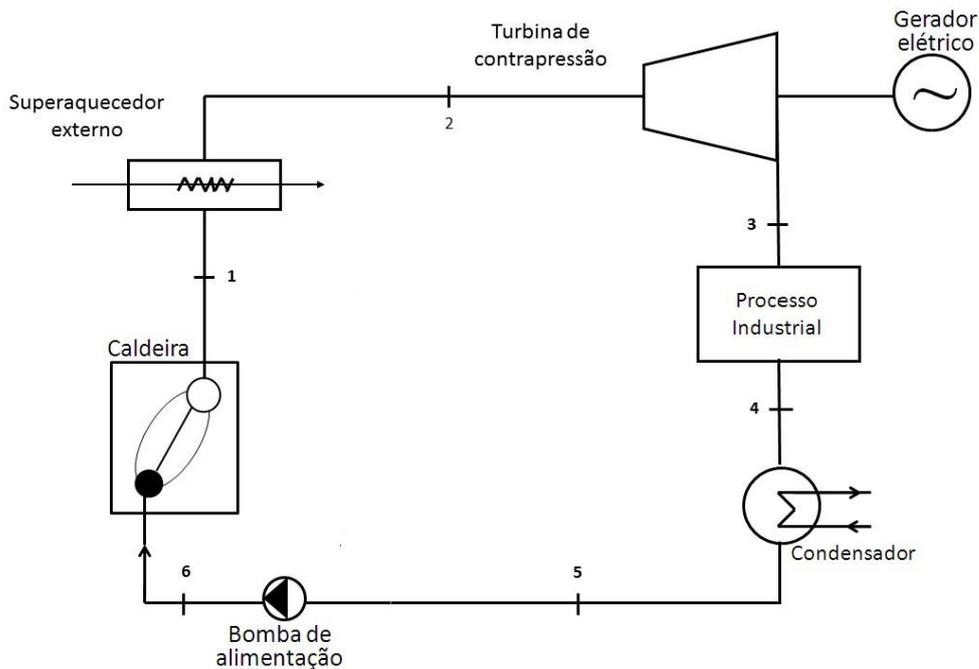


Figura 22 - Layout do sistema de cogeração proposto empregando turbina de contrapressão

Fonte: Pesquisa direta, 2017

Observa-se na Figura 22 que a proposta se baseia em um sistema que emprega uma caldeira que produz vapor saturado o qual é superaquecido por um superaquecedor externo a fim de se alcançar uma temperatura ideal para a turbina. O vapor admitido na turbina de contrapressão gera potência elétrica para demanda elétrica da planta. A caracterização da cogeração é representada quando ocorre o aproveitamento do vapor que sai da turbina para o atendimento da demanda de vapor da planta industrial de acordo com as especificações necessárias para o processo produtivo.

A central ainda pode ser classificada como sendo de um sistema *topping*, ocorre primeiramente a geração de energia elétrica e posteriormente de energia térmica, assim como conceituado.

Adotou-se a paridade térmica como a estratégia de operação para este sistema de cogeração, visto que no Brasil não há fornecimento e distribuição de vapor por uma concessionária como é o caso da eletricidade. Vale ressaltar que se houver a produção de excedente de energia elétrica esta seria uma consequência da escolha deste modo de operação.

4.2.1 Os equipamentos selecionados e os cenários envolvidos no sistema de cogeração

Para atendimento da demanda energética, utilizou-se apenas como combustível a casca de café gerado pelo processamento do café na indústria e os dados da colheita e da casca de café são apresentados na Tabela 12, que levam em conta as perspectivas do setor cafeeiro, considerando a taxa de crescimento de 2,7% ao ano e, desta forma, estabeleceu-se para efeitos de cálculos o crescimento das demandas energéticas do setor em 29,1% até o ano de 2026.

Tabela 12 - Dados da colheita de café e a casca de café

Tempo de safra	120 dias
Tempo efetivo da safra (h)	2.880 h
Produção de café atual processado total na safra	290 toneladas
Perpectivas de crescimento do setor cafeeiro até o ano de 2026	29,1%
Estimativa da produção de café ano de 2026	374,4 toneladas
Relação casca/café coletado x (100%)	50%
Casca de café produzida na safra futura	374,4 toneladas
Produção horária de casca de café	0,1300 ton/h
PCI da casca de café	15.564,992 kJ/kg (calculado a partir da equação 26)

Fonte: Pesquisa direta, 2017

A partir da quantidade de casca de café consumida pela caldeira, cujas especificações são apresentadas na Tabela 13 e ilustrada na Figura 23, e a produção de vapor para atendimento das demandas energéticas foram estudados três cenários estudados: cenário Base - TCP com atendimento total da demanda térmica, o cenário 1 - TCP atendimento total da demanda térmica e elétrica e o cenário 2 - TCP com a utilização de toda casca de café gerada na indústria. A turbina de contrapressão utilizada em todos os cenários está caracterizada na Tabela 14 e ilustrada na Figura 24.

Tabela 13 - Dados da caldeira

CARACTERÍSTICAS DA CALDEIRA	
Fabricante	Yuanda Boiler
Modelo	SZI D Series
Tipo	SZL2-1.25/2.5-AII
Capacidade máxima de produção de vapor	2 t/h
Combustível	casca de arroz, pellet de biomassa, concha de coco, casca de amendoim, bagaço, casca de café, casca de palma, casca de caju e outros combustíveis de biomassa
Pressão do vapor de saída	1,25 MPa/2,5 MPa
Temperatura do vapor de saída	194°C/ 226°C
Eficiência da caldeira	81,6%

Fonte: Yuanda Boiler, 2017



Figura 23 - Caldeira selecionada

Fonte: Yuanda Boiler, 2017

Tabela 14 - Dados da turbina de contrapressão

TURBINA DE CONTRAPRESSÃO	
Fabricante	Siemens
Modelo	SST-050
Pressão do vapor de entrada	Até 101 bar
Temperatura máxima	500°C
Pressão do vapor de escape (processo fabril)	11bar
Eficiência do turbogerador de contrapressão	81%
Principais características	Baixa manutenção devido à estrutura simples; Elevada segurança operacional; Permite partida rápida; Turbina com alimentação de óleo incluída; Corresponde às especificações da API 611/612.

Fonte: Siemens, 2017



Figura 24 - Turbina de contrapressão selecionada

Fonte: Siemens, 2017

Como pode ser notado na Tabela 13, a caldeira possui uma temperatura máxima de 226°C que é muito próximo da linha de saturação do vapor. Devido a este fato, foi utilizado um superaquecedor externo para aumentar essa temperatura a 300 °C e distanciar desse limite devido ao uso de uma turbina de contrapressão. A eficiência do aquecedor empregado foi de 80%.

Vale ressaltar que a bomba utilizada nos cenários tem eficiência isentrópica de 70%. Como apresentado na Tabela 14, a eficiência da turbina de contrapressão é de 81% e a eficiência da caldeira é ligeiramente maior, contemplando o valor de 81,6%.

4.2.2 Resumo da análise energética do sistema de cogeração proposto

A partir das equações termodinâmicas aplicáveis ao ciclo Rankine como mostrado na seção 2.2.2.1 e 2.2.2.2 determinou-se as propriedades termodinâmicas de cada ponto demarcado de acordo com a Figura 22. Cada ponto representa os estados do fluido de trabalho na entrada e na saída de cada equipamento componente do ciclo.

As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam os fluxos mássicos e os valores de pressão, temperatura, entalpia, entropia e título de cada ponta da Figura 22 variando-se, ainda, segundo cada cenário estudado.

Tabela 15 - Caracterização do Cenário Base - TCP

CENÁRIO BASE – TCP						
Pontos	Vazão Mássica [kg/s]	Pressão [bar]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg.K]	Título [-]
1	0,02186	22,50	226,0	2824,502	6,3439	-
2	0,02186	22,50	300,0	3016,200	6,7023	-
3s	0,02186	10,00	201,6	2831,800	6,7023	-
3	0,02186	10,00	216,5	2866,836	6,7749	-
4	0,02186	1,00	99,6	417,460	1,3026	0
5	0,02186	1,00	98,0	410,600	1,2842	-
6s	0,02186	29,25	98,2	413,550	1,2842	-
6	0,02186	29,25	98,5	414,814	1,2876	-

Fonte: Pesquisa direta, 2017

Tabela 16 - Caracterização do Cenário 1 - TCP

CENÁRIO 1 - TCP						
Pontos	Vazão Mássica [kg/s]	Pressão [bar]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg.K]	Título [-]
1	0,03573	22,50	226	2824,502	6,3439	-
2	0,03573	22,50	300	3016,200	6,7023	-
3s	0,03573	10,00	201,6	2831,800	6,7023	-
3	0,03573	10,00	216,5	2866,836	6,7749	-
4	0,03573	1,00	99,6	417,460	1,3026	0
5	0,03573	1,00	98,00	410,600	1,2842	-
6s	0,03573	29,25	98,2	413,550	1,2842	-
6	0,03573	29,25	98,5	414,814	1,2876	-

Fonte: Pesquisa direta, 2017

Tabela 17 - Caracterização do Cenário 2 - TCP

CENÁRIO 2 - TCP						
Pontos	Vazão Mássica [kg/s]	Pressão [bar]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg.K]	Título [-]
1	0,17606	22,50	226	2824,502	6,3439	-
2	0,17606	22,50	300	3016,200	6,7023	-
3s	0,17606	10,00	201,6	2831,800	6,7023	-
3	0,17606	10,00	216,5	2866,836	6,7749	-
4	0,17606	1,00	99,6	417,460	1,3026	0
5	0,17606	1,00	98,0	410,600	1,2842	-
6s	0,17606	29,25	98,2	413,550	1,2842	-
6	0,17606	29,25	98,5	414,814	1,2876	-

Fonte: Pesquisa direta, 2017

Através das Tabelas 15, 16 e 17, percebe-se que existe diferença apenas da vazão mássica nos pontos das propriedades termodinâmicas. Isso acontece porque nos cenários analisados só se varia a quantidade do combustível de casca de café utilizado nos processos e, assim, a vazão mássica de vapor.

A Tabela 18 apresenta um quadro do resumo energético e da vazão mássica do sistema de cogeração proposto de acordo com cada cenário estudado.

Tabela 18 - Fluxo energético e mássico do sistema de cogeração proposto

PARÂMETRO			CENÁRIO	CENÁRIO	CENÁRIO
			BASE -TCP	1 - TCP	2 - TCP
ENTRADA	Energia do combustível fornecido a caldeira	kWth	64,55	115,52	519,91
	Vazão mássica de casca de café na caldeira	ton/h	0,01493	0,02440	0,12025
	Vazão mássica de vapor produzido na caldeira	kg/s	0,02186	0,03573	0,17606
	Vazão mássica de vapor produzido na caldeira	ton/h	0,07869	0,12863	0,63381
	Energia do combustível fornecido ao superaquecedor externo	kWth	5,24	8,56	42,18
	Vazão mássica de casca de café no superaquecedor	ton/h	0,00121	0,00198	0,00975
SAÍDA	Energia térmica produzida	kWt	53,38	53,38	53,38
	Energia elétrica produzida	kWe	3,27	5,34	26,30
	Sobra horária da casca de café	ton/h	0,114	0,104	0
	Eficiência global de cogeração	%	81,16	51,47	14,17

Fonte: Pesquisa direta, 2017

A partir dos dados da Tabela 18, nota-se que os cenários apresentam variações de eficiência global, sendo o Cenário Base – TCP de 81,16%, o Cenário 1 – TCP de 51,47% e o Cenário 2 – TCP de 14,17%. Em todos os cenários são supridas as demandas térmicas. O cenário 1 – TCP e cenário 2 -TCP são supridas tanto a energia térmica, quanto a energia elétrica

na indústria cafeeira. No cenário 2 – TCP ocorre geração de excedente de energias elétrica e térmica e o consumo de toda a casca de café.

Dentro dos cenários, o Cenário Base – TEC é o mais apropriado para esta configuração, pois, mesmo não suprimindo toda a demanda elétrica do processo, apresenta o maior valor de eficiência que é de 81,16%.

4.3 Comparação com outro sistema de cogeração

Através da caracterização das necessidades energéticas da indústria obteve-se o inverso de alfa, que é de 0,1 kWth/kWe e que permite ainda utilizar a configuração de uma central de cogeração aplicando uma turbina de extração-condensação, sendo este formado com o intuito de comparar com o sistema proposto para a indústria cafeeira em estudo.

A Figura 25 demonstra o esquema da central de cogeração para fins de comparação utilizando uma turbina de extração-condensação.

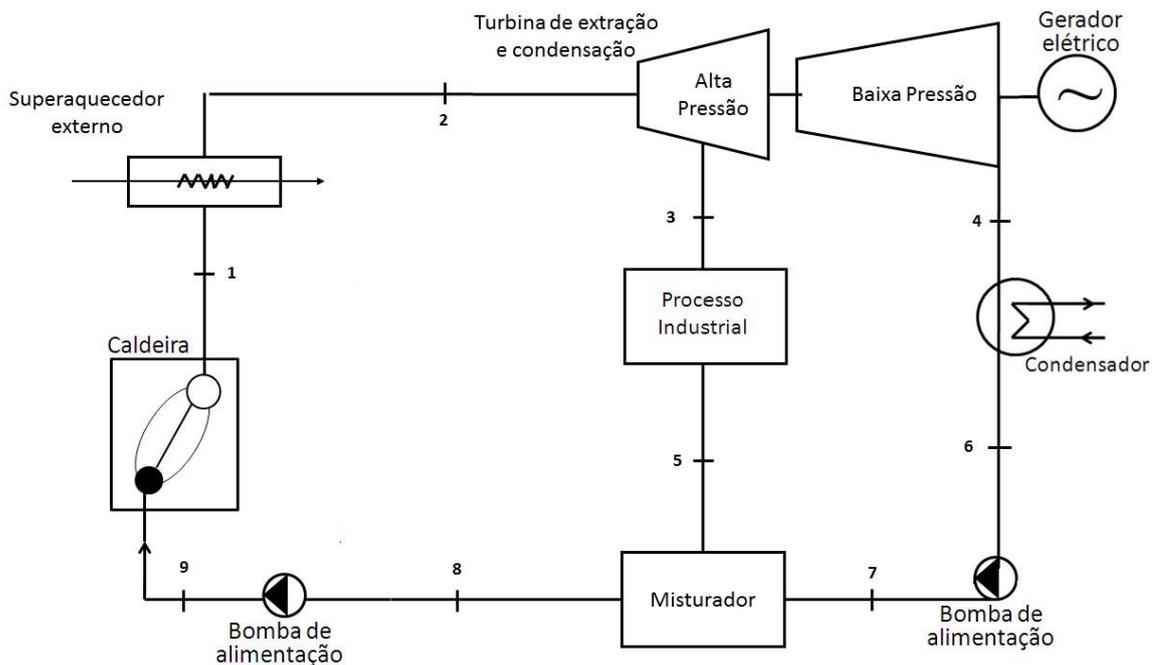


Figura 25 - Layout do sistema de cogeração comparativo empregando turbina de extração – condensação
Fonte: Pesquisa direta, 2017

Na figura 25 é possível notar que o sistema é do tipo *topping*. Além disso, o sistema foi dimensionado para operar em paridade térmica, pois o consumo de energia térmica da unidade de processo é totalmente suprido pelo vapor que sai da turbina de alta pressão.

O modo de funcionamento da central de cogeração baseia-se no vapor saturado que sai da caldeira e é superaquecido no superaquecedor externo. Ao entrar na turbina de alta pressão, o vapor primeiramente gera energia mecânica e depois parte dele vai para o processo para atendimento da energia térmica e a outra parte vai para a turbina de baixa pressão, a qual sofre o processo de expansão até a pressão de operação do condensador. Este fluido é expandido pela turbina de baixa pressão, gerando a potência elétrica a partir do gerador acoplado a turbina.

A cogeração se caracteriza através do aproveitamento do calor extraído pela unidade de processo e a energia elétrica que é produzida na turbina de baixa pressão. A energia elétrica é utilizada na demanda de energia elétrica da empresa e seu excedente vendido à concessionária local.

4.3.1 Os equipamentos selecionados e os cenários envolvidos no sistema de cogeração

Para o estudo do sistema de cogeração comparativo, utilizou-se os mesmos dados de colheita da Tabela 12 e os mesmos dados da caldeira na Tabela 13 do sistema de cogeração proposto. A única diferença foi pelo uso da turbina de extração e condensação utilizado em todos os cenários e caracterizado na Tabela 19 e ilustrada na Figura 26.

A partir da quantidade de casca de café consumida pela caldeira e a produção de vapor para atendimento das demandas energéticas ocorrem a caracterização dos três cenários estudados. No Cenário Base - TEC o atendimento total da demanda térmica e elétrica do processo, o Cenário 1 - TEC atendimento total da demanda térmica e a produção de energia elétrica com toda casca de café na safra e o Cenário 2 - TEC atendimento total da demanda térmica e elétrica durante a safra e a produção de energia elétrica com a sobra da casca de café na entressafra.

Tabela 19 - Dados da turbina de extração - condensação

TURBINA DE EXTRAÇÃO-CONDENSAÇÃO	
Fabricante	Siemens
Modelo	SST-110
Pressão do vapor de entrada	Até 131 bar
Temperatura máxima	530°C
Pôtença elétrica máxima gerada	7000 kWe
Pressão de escape	Contrapressão ou vácuo
Eficiência do turbina de alta pressão	85%
Eficiência do turbina de baixa pressão	82%
Principais características	Versão com contrapressão, extração ou condensação; Versão com skid integrado; Sistema de óleo integrado no quadro básico; Regulagem do grupo de injetores disponível; Partida rápida sem pré-aquecimento; Estrutura muito compacta; Extração com pressão regulada e/ou alimentação; Disposição para alta e baixa pressão;Corresponde às especificações da API 611/612*

Fonte: Siemens, 2017



Figura 26 - Turbina de extração - condensação selecionada

Fonte: Siemens, 2017

Vale ressaltar que nesse sistema de cogeração comparativo utilizou-se duas bombas nos cenários com eficiência isentrópica de 70%. Há também, o uso de um misturador para juntar a vazão mássica proveniente do processo e da bomba da turbina de baixa pressão. Como apresentado na Tabela 19, a eficiência da turbina de extração - condensação é de 85% na turbina de alta pressão e de 82% na turbina de baixa pressão.

4.3.2 Resumo da análise energética do sistema de cogeração comparativo

A partir das equações termodinâmicas aplicáveis ao ciclo Rankine como mostrado na seção 2.2.2.1 e 2.2.2.2 determinou-se as propriedades termodinâmicas de cada ponto demarcado de acordo com a Figura 25. Cada ponto representa os estados do fluido de trabalho na entrada e na saída de cada equipamento componente do ciclo.

As Tabelas 20, 21 e 22 apresentam os fluxos mássicos e os valores de pressão, temperatura, entalpia, entropia e título de cada ponta da Figura 23 variando-se, ainda, segundo cada cenário estudado.

Tabela 20 - Caracterização do Cenário base - TEC

CENÁRIO BASE – TEC						
Pontos	Vazão Mássica [kg/s]	Pressão [bar]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg.K]	Título [-]
1	0,02914	22,50	226,00	2824,502	6,3439	-
2	0,02914	22,50	300,00	3016,200	6,7023	-
3s	0,02186	10,00	201,64	2831,800	6,7023	-
3	0,02186	10,00	213,33	2859,460	6,7598	-
4s	0,007285	0,10	45,81	2122,800	6,7023	0,8070
4	0,007285	0,10	45,81	2283,612	7,2065	0,8742
5	0,02186	1,00	99,62	417,460	1,3026	0
6	0,007285	0,10	44,00	184,260	0,6255	-
7s	0,007285	1,00	44,003	184,350	0,6255	-
7	0,007285	1,00	44,01	184,388	0,6256	-
8	0,02914	1,00	85,78	359,202	1,1434	-
9s	0,02914	29,25	85,95	362,130	1,1434	-
9	0,02914	29,25	86,25	363,385	1,1469	-

Fonte: Pesquisa direta, 2017

Tabela 21 - Caracterização do Cenário 1 – TEC

CENÁRIO 1 – TEC						
Pontos	Vazão Mássica [kg/s]	Pressão [bar]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg.K]	Título [-]
1	0,16378	22,50	226,00	2824,502	6,3439	-
2	0,16378	22,50	300,00	3016,200	6,7023	-
3s	0,02186	10,00	201,64	2831,800	6,7023	-
3	0,02186	10,00	213,33	2859,460	6,7598	-
4s	0,14192	0,10	45,81	2122,800	6,7023	0,8070
4	0,14192	0,10	45,81	2283,612	7,2065	0,8742
5	0,02186	1,00	99,62	417,460	1,3026	0
6	0,14192	0,10	44,00	184,260	0,6255	-
7s	0,14192	1,00	44,003	184,350	0,6255	-
7	0,14192	1,00	44,01	184,388	0,6256	-
8	0,16378	1,00	51,46	215,517	0,7226	-
9s	0,16378	29,25	51,57	218,380	0,7226	-
9	0,16378	29,25	51,86	219,6069	0,7264	-

Fonte: Pesquisa direta, 2017

No cenário 2 - TEC, durante a safra de 4 meses, o layout e os pontos e propriedades termodinâmicas envolvidos são idênticos ao do Cenário Base - TEC. Como há uma grande quantidade de sobra de casca de café no final da safra, analisou-se a opção de produção somente de energia elétrica na turbina de baixa pressão na entressafra, cessando o envio de fluxo de vapor para os processos com demanda térmica. A Figura 27 demonstra o esquema do cenário 2 entressafra – TEC utilizado na entressafra.

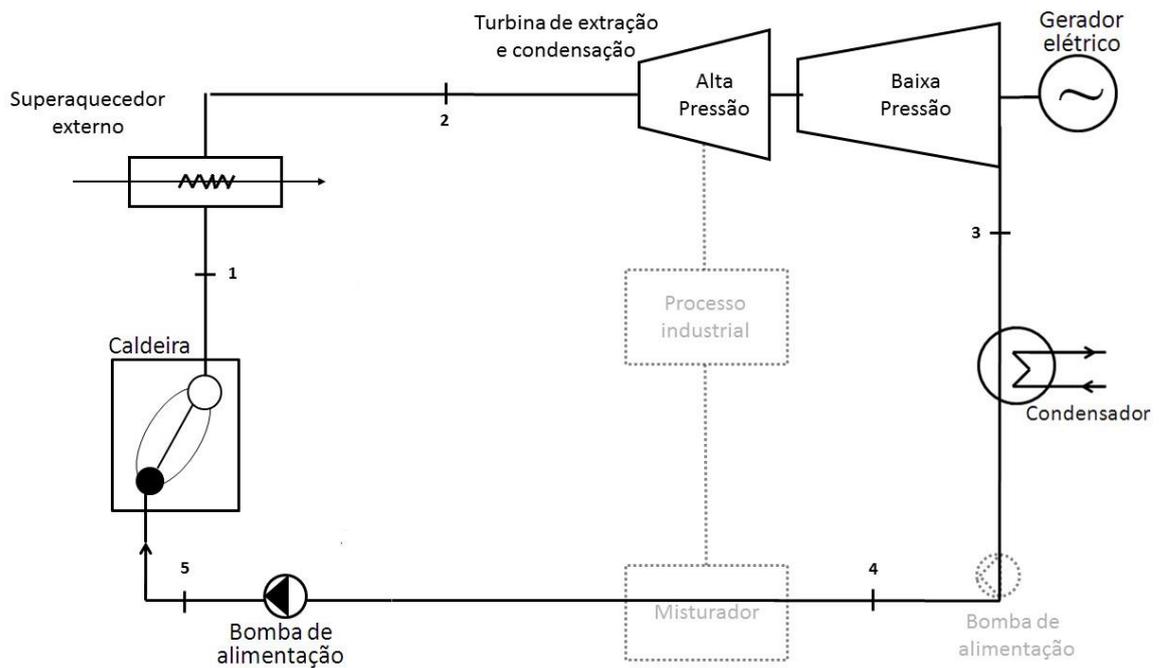


Figura 27 - Layout de cogeração do cenário entressafra 2 - TEC empregando turbina de extração - condensação

Fonte: Pesquisa direta, 2017

A partir da sobra de casca de café evidenciado no cenário base de 0,11 ton/h nos 4 meses de safra, ou 311,2 toneladas, simulou-se o período de geração de energia elétrica para entressafra nos outros 8 meses que não há colheita de café. Este é o período de entressafra e é o tempo limite para operação da turbina nestas condições, considerando que imediatamente após este período inicia-se uma nova safra. Para questões de manutenção de toda central de cogeração, o tempo utilizado nos cálculos foi de 6 meses ou 180 dias de operação nessas condições. Isto corresponde a uma produção horária nos dias de 0,07 ton/h.

A Tabela 22 apresenta os fluxos mássicos e os valores de pressão, temperatura, entalpia, entropia e título de cada ponto da Figura 27.

Tabela 22 -Caracterização do Cenário 2 Entressafra - TEC

CENÁRIO 2 ENTRESSAFRA– TEC						
Pontos	Vazão Mássica [kg/s]	Pressão [bar]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg.K]	Título [-]
1	0,08942	22,5	226,00	2824,502	6,3439	-
2	0,08942	22,5	300,00	3016,200	6,7023	-
3s,a	0,08942	0,10	45,81	2122,800	6,7023	0,8070
3a	0,08942	0,10	45,81	2283,612	7,2065	0,8742
3s,b	0,08942	0,10	45,81	2122,800	6,7023	0,8070
3b	0,08942	0,10	45,81	2256,810	7,1225	0,8630
3a,b	0,08942	0,10	45,81	2270,211	7,1645	0,8685
4	0,08942	0,10	44,00	184,260	0,6254	-
5s	0,08942	29,25	44,09	187,200	0,6255	-
5	0,08942	29,25	44,40	188,460	0,6284	-

Fonte: Pesquisa direta, 2017

A Tabela 23 apresenta um quadro resumo energético e da vazão mássica do sistema de cogeração comparativo de acordo com cada cenário estudado.

Tabela 23 - Fluxo energético e mássico do sistema de cogeração comparativo

PARÂMETRO			CENÁRIO BASE-TEC	CENÁRIO 1 - TEC	CENÁRIO 2 - TEC	
					Safra	Entres- safra
ENTRADA	Energia do combustível fornecido a caldeira	kWth	87,903	522,836	87,903	288,875
	Vazão mássica de casca de café na caldeira	ton/h	0,02033	0,03359	0,02033	0,01856
	Vazão mássica de vapor produzido na caldeira	kg/s	0,02914	0,16378	0,02914	0,08942
	Vazão mássica de vapor produzido na caldeira	ton/h	0,10492	0,58961	0,10492	0,32192
	Energia do combustível fornecido ao superaquecedor externo	kWth	6,9838	39,246	6,9838	21,427
	Vazão mássica de casca de café no superaquecedor externo	ton/h	0,00161	0,00907	0,00161	0,00495
SAÍDA	Energia térmica produzida	kWt	53,383	53,383	53,383	0
	Energia elétrica produzida	kWe	8,763	129,641	8,763	133,007
	Sobra horária da casca de café	ton/h	0,10805	0	0,10805	0
	Eficiência global de cogeração	%	65,50	32,56	65,50	42,68

Fonte: Pesquisa direta, 2017

A partir dos dados da Tabela 23, nota-se que os cenários apresentam variações de eficiência global, sendo o Cenário Base – TEC de 65,50%, o Cenário 1 – TEC de 32,56% e o

Cenário 2 – TEC de 65,50% na safra e 42,68% na entrefassa. Em todos os cenários são supridas as demandas energéticas, tanto a energia térmica, quanto a energia elétrica na indústria cafeeira. No Cenário 1 -TEC e Cenário 2 – TEC ocorre geração de excedentes de energias elétrica e térmica e o consumo de toda a casca de café.

4.4 Considerações finais

A Figura 28 apresenta um gráfico resumo da energia térmica e elétrica produzidas, a energia produzida pelo combustível e a eficiência global na central de cogeração proposta empregando a turbina de contrapressão.

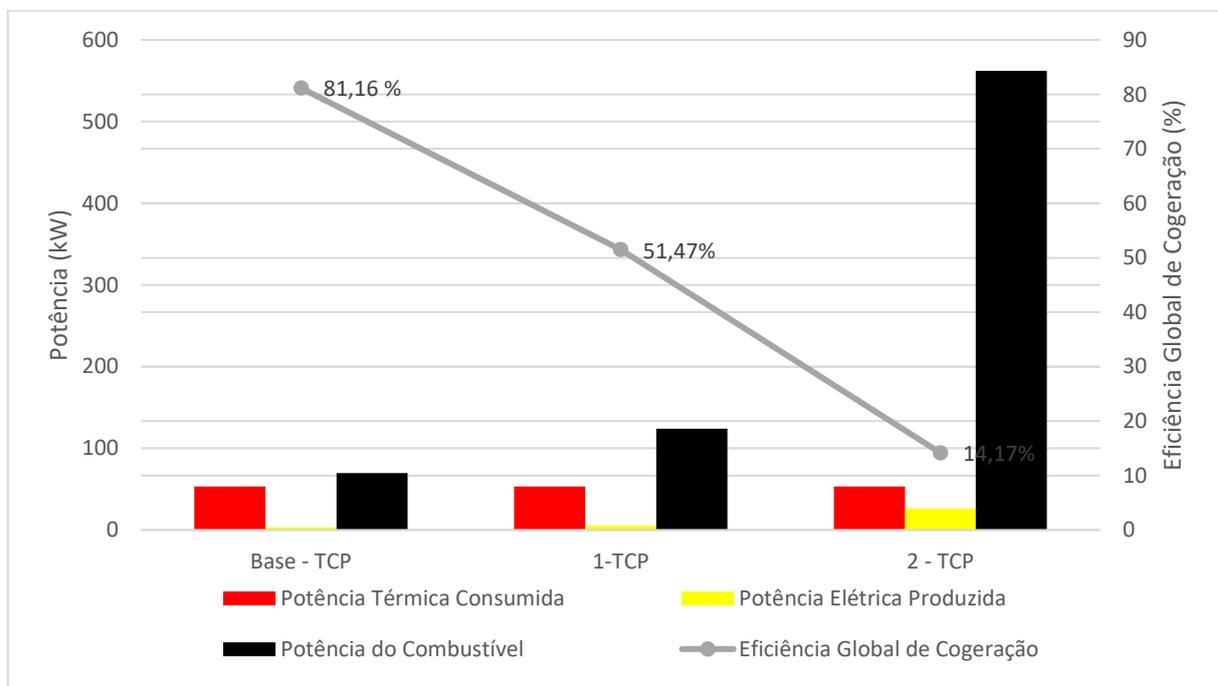


Figura 28 - Gráfico resumo das demandas energéticas do sistema de cogeração proposto – TCP

Fonte: Pesquisa direta, 2017

Pela Figura 28, tem-se as demandas energéticas agrupadas de acordo com o cenário estudado e suas eficiências.

Na análise dos três cenários envolvidos a proposta deste sistema de cogeração permite afirmar que as demandas energéticas são perfeitamente atendidas apenas no Cenário 1 – TCP, sendo a demanda térmica (53,38kW) e elétrica (5,34%) do processo, mas sua eficiência global comporta-se baixa (51,47%) devido à perda de energia térmica que não é consumida pelo processo. Verifica-se ainda que a eficiência global possui maior valor no Cenário Base – TCP (81,16%), entretanto a demanda elétrica foi atendida em 61% do total de 5,337 kW que o processo exige.

É passível de análise, a constância da eficiência entre as variações dos sistemas perante um mesmo cenário, isto ocorre devido a formulação para obtenção da eficiência, equação 9, que consiste na razão entre o total de energia (térmica e elétrica) produzida e o somatório das energias fornecidas pelos combustíveis que são admitidos no sistema, ou seja, não está relacionado com o consumo de energia e eletricidade.

Em contrapartida, a Figura 29, exhibe um gráfico da energia térmica e elétrica produzida na central de cogeração comparativa que emprega uma turbina a vapor de extração-condensação.

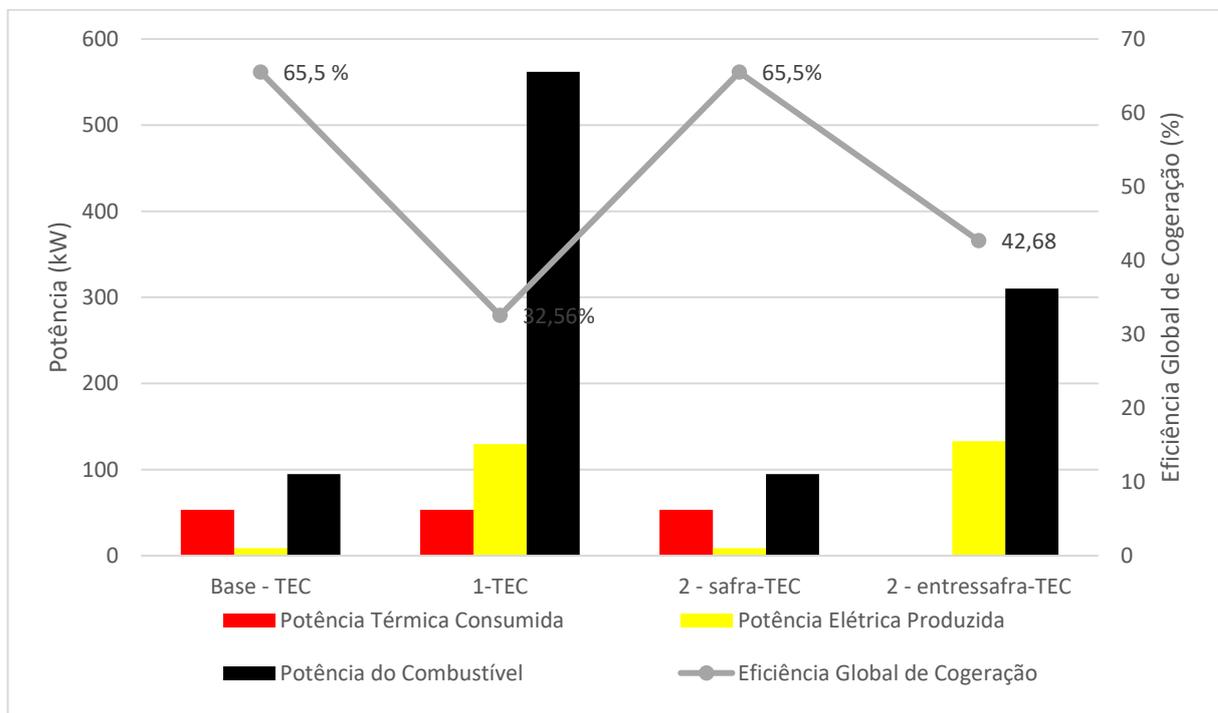


Figura 29 - Gráfico resumo das demandas energéticas do sistema de cogeração comparativo – TEC
Pesquisa direta, 2017

Pela Figura 29, observa-se que o sistema de cogeração empregando a turbina de extração-condensação variou entre 30% a 65% a eficiência global nos cenários envolvidos. O Cenário 2- TEC apresenta o acréscimo da entressafra no sistema estudado, onde utilizou-se a sobra da casca de café da safra para gerar energia elétrica durante o período da entressafra. Este cenário apresenta uma opção vantajosa, pois além de suprir toda demanda elétrica e térmica do processo durante os dias de safra, possui uma produção de energia que pode ser comercializada durante o tempo de entressafra.

Verifica-se que a eficiência global de cogeração possui um valor de 65,50% no Cenário 2 – Safra - TEC e de 42,68% no Cenário 2 – Entressafra – TEC.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo finaliza o presente trabalho apresentando as conclusões obtidas através do estudo realizado e recomendações para novas pesquisas.

5.1 Conclusões

O crescimento do setor cafeeiro 29,1% até o final do ano de 2026, incentiva o uso racional de energia e conforme o cenário previsto para o setor cafeeiro é de grande importância, visto que foi utilizado para manter os sistemas de cogeração de acordo com as necessidades futuras de calor e eletricidade da indústria em estudo.

O inverso do parâmetro ALFA que caracteriza a indústria cafeeira foi de 10,0 kWt/kWe. A razão calor/potência elétrica de componentes do sistema de cogeração sugere a implantação de um sistema de cogeração empregando uma turbina de contrapressão ou uma turbina de extração-condensação.

Dessa forma, a central de cogeração proposta foi dimensionada para operar em paridade térmica e em configuração *topping*. Esta configuração apresentou resultados satisfatórios, em relação a eficiência global, apenas no Cenário Base – TCP em que se busca atender toda demanda térmica com o valor de 81,16%, onde atendeu a toda demanda térmica e 61% da demanda elétrica do processo produtivo. O Cenário 1 – TCP atendeu toda demanda térmica e elétrica do processo, mas sua eficiência ficou muito abaixo (51,47%) da utilizada em um sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão evidenciado, de 84% a 92%. Em ambos os cenários ainda há sobra de casca de café na indústria.

O sistema de cogeração comparativo que emprega uma turbina a vapor de extração-condensação apresenta eficiência global inferior ao sistema proposto, cujo valor máximo foi de 65,50%. Apesar de menor eficiência, esta unidade de cogeração que também é caracterizada em paridade térmica e em configuração *topping*, atende todas as necessidades energéticas da planta industrial nos cenários estudados. Nos cenários 1-TEC em que busca e 2-TEC, existe a geração de excedentes de energia elétrica.

Para o sistema comparativo, dentre os cenários analisados, o Cenário Base – TEC e Cenário 2 – TEC apresentam maiores valores de eficiência, 65,50%. Entretanto, o Cenário 2-TEC apresenta o acréscimo da entressafra no sistema estudado, onde utilizou-se a sobra da casca de café da safra para gerar energia elétrica durante o período da entressafra. Este cenário apresenta uma opção vantajosa, pois além de suprir toda demanda elétrica (5,34kWe) e térmica

(53,38kWh) do processo durante os dias de safra, possui uma produção de energia, de 133,01kWh, que pode ser comercializada durante o tempo de 180 dias na entressafra. A eficiência global no período de entressafra é de 42,68%.

Enfatiza-se que como neste trabalho não há uma análise econômica dos equipamentos, as escolhas dos cenários estudados estão relacionadas as demandas energéticas produzidas e consumidas pelos equipamentos.

Finalizando, o sistema de cogeração comparativo utilizando a turbina a vapor de extração-condensação no Cenário 2 – TEC pode ser implantado pela empresa cafeeira hipotética estudada, pois atende as demandas energéticas do processo produtivo durante a safra e ainda produz energia elétrica durante 6 meses na entressafra com a sobra de casca de café, além de apresentar uma eficiência global de cogeração dentro dos valores estabelecidos. Ressalta-se que para uma proposição completa e concisa de um sistema de cogeração, o investimento inicial nos equipamentos como motogerador, superaquecedor externo e caldeira devem ser estudados. O tempo de retorno financeiro é outro parâmetro decisivo para a escolha do adequado projeto, assim como o preço, manutenção e vida útil dos equipamentos. Neste contexto, são sugeridas estas análises em estudos futuros como descrito no item a seguir.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Como sugestões para novos trabalhos na área pode-se citar:

- Análise de viabilidade econômica da central de cogeração escolhida;
- Utilização de dados reais de uma empresa do ramo cafeeiro;
- Análise exérgicas dos secadores utilizados na indústria cafeeira;
- Proposição de outras unidades de cogeração envolvendo outros ciclos térmicos para a indústria cafeeira abordada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIC. Associação Brasileira da Indústria do Café. **ABIC**, 17 janeiro 2017. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?tpl=home>>.

ABREU, Y. V. **Estudo comparativo da eficiência energética da indústria da cerâmica de revestimento via úmida no Brasil e na Espanha**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2001.

ANDRADE, A. S. Geradores de vapor, 2017. Disponível em: <<http://www.madeira.ufrp.br/disciplinasalan/AT056-Aula03.pdf>>. Acesso em: 24 março 2017.

ANDRADE, E. T. D.; FILHO, D. O.; VIEIRA, G. Potencial de conservação de energia no pré-processamento do café. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 2, p. 71-82, 2000. ISSN 2.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL**, 2002. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração – geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: UFSC, 2002.

BASTOS, J. B. V. Avaliação de Mecanismos de Incentivo à Cogeração de Energia a partir do Bagaço da Cana de Açúcar em uma Planta Química Brasileira de Soda-Cloro. **Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química**, Rio de Janeiro, 2011.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. Florianópolis: Da UFSC, 1995.

BENITO, Y. Energia e Mudança Climática. **Programa de capacitação em Energias Renováveis**, 2013.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Situação atual e perspectivas da utilização da biomassa para a geração de energia, 2005. Disponível em: <http://www.tractebelenergia.com.br/wps/wcm/connect/3133ef5d-0680-4c2f-a617-3b4794b2266b/0403-001-2005_art.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE3133ef5d-0680-4c2f-a617-3b4794b2266b>. Acesso em: 23 março 2017.

BRASIL. Decreto n. 2.003. **de 10 de setembro de 1996. Regulamenta a Lei n. 9.074, de 7 de julho de 1995, que define a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor e dá outras providências**, 1996. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2003.htm>. Acesso em: 23 março 2017.

BRASIL, N. P. Apostila de co-geração. Rio de Janeiro, agosto 2005.

BUSSI, J.; CASTIGLIORI, J.; TANCREDI, N. Biomassa como matéria prima para la producción de energía, compuestos químicos y otros materiales. **Química sustentable**, Santa Fé, Argentina, 2004.

CALEGARI, L. et al. Características de Algumas Biomassas Usadas na Geração de Energia no Sul do Brasil. **Biomassa e Energia**, v. 2, p. 37-46, 2005. ISSN 1.

CALLE, ; BAJAY, V.; ROTHMAN, . **Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira**. [S.l.]: Unicamp, 2008.

CAPUTO, A. C.; PALUMBO, M.; SCACCHIA, F. Perspectives of RDF use in decentralized areas: comparing power and co-generation solutions. **Applied Thermal Engineering**, v. 24, p. 2171-2187, 2004.

CARVALHO, M. B. Análise de um sistema de cogeração empregando turbina a gás aplicado a uma indústria de Malte. **Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia em Guaratinguetá**, Guaratinguetá, 2004.

CNC. Conselho Nacional do Café. **Conselho Nacional do Café**, 17 março 2017. Disponível em: <<http://www.cncafe.com.br/site/>>.

COMÉRIO, L. et al. Casca do café para a geração de energia: caracterização da biomassa e análise dos gases de combustão. **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Fortaleza, 2016.

CONAB. Conselho Nacional de Abastecimento. **Conselho Nacional de Abastecimento**, 17 novembro 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>.

CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ (CNC). cncafe, 30 março 2017. Disponível em: <<http://www.cncafe.com.br/site/interna.php?id=10080>>.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: UNICAMP, 2008.

CRESWELL, J. W. Qualitative Inquiry and Research Design : Choosing Among Five Traditions. **Thousand Oaks**, London, 1998.

CUNHA, R. T. A.; SANTIAGO, P. F. Análise de viabilidade econômica da instalação de uma planta de cogeração no Hospital Clementino Fraga Filho situado na UFRJ. **Trabalho de conclusão de curso Engenharia Mecânica - UFRJ**, Rio de Janeiro, 2002.

DARWICHE, T. J. A matriz energética brasileira: evolução da estrutura de oferta e demanda. **Monografia - Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 2010.

DEVKI ENERGY CONSULTANCY PVT. LTD. Best Practice Manual of Cogeneration, 2006. Disponível em: <<http://www.energymanagertraining.com/CodesandManualsCD-5Dec%2006/BEST%20PRACTICE%20MANUAL-COGENERATION.pdf>>.

DORNBURG, V.; FAAIJ, A. P. C. Efficiency and economy of wood-fire biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies. **Biomass & Energy**, p. 91-108, 2001.

ELÉTRICA, A.- A. N. D. E. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília. 2002.

EMBRAPA, E. B. D. P. A. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. [S.l.]: [s.n.]. 2016.

EMPRESAS, S. -S. B. D. A. À. M. E. P. **Boletim Setorial do Agronegócio - Café**. [S.l.]. 2011.

ENGECROL. **Catálogo de Produtos**. Campinas: [s.n.], 2007. Disponível em: <www.engecrol.com.br/produtos.html>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2016**. Rio de Janeiro. 2016.

FERRARI, A. T. **Metodologia da pesquisa científica**. São Paulo: McGraw - Hill do Brasil, 1982.

- FOELKEL, C. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade - Parte 2: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade.** [S.l.]: Celsius Degree/ Grau Celsius, 2016. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br/disponiveis.html>>. EUCALYPTUS ONLINE BOOK.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Metodos de Pesquisa.** Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- GOEHRS, O. Guide pratique de l'energy dans l'entreprise. **Lés diverses**, p. V. 5, p.7-84, 1984.
- HORLOCK, J. H. **Cogeneration – Combined heat and power (CHP): thermodynamics and economics.** 2. ed. Florida: Krieger, 1997. 226 p.
- IBGE, I. B. D. G. E. E., 20 agosto 2016.
- IEA. International Energy Agency. **Combined Heat and Power: evaluating the benefits of greater global investments**, 2008.
- INEE, -I. N. D. E. E. Instituto Nacional de Eficiência Energética, 20 novembro 2014. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_sobre_gd_cg.asp?Cat=forum>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Bioenergy Project Development & Biomass Suply.** [S.l.]. 2007.
- JUNIOR, R. A. R. Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira. **Dissertação (Mestrado em Ciências Térmicas) - Engenharia Mecânica**, Ilha Solteira, 2009.
- KLAUTAU, J. V. P. Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos.. **Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA**, Curitiba, 2008.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. D. A. **Fundamentos de metodologia científica.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. D. **Geração Termelétrica.** Rio de Janeiro: Interciência, v. 2, 2004.
- LORA, E. S.; ANDRADE, R. V. Biomass as energy source in Brasil. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, p. V.13, p.777-788, 2009.
- LTD., D. E. C. P. **Best Practice Manual of Cogeneration.** [S.l.]. 2006.
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. E. A. Projeções do Agronegócio: Brasil 2015/16 a 2025/26 Projeções de Longo Prazo. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, Brasília, 2016.
- MARBE, A.; HARVEY, S.; BERNTSSON, T. Biofuel gasification combined heat and. **Energy**, p. p.1117-1137, 2004.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, 83, maio 2002. 37-46.
- MELLO, M. G. Energia da Biomassa - a grande oportunidade de Minas e do Brasil. Belo Horizonte: Cemig, 2001. p. 21.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica Para Engenharia.** [S.l.]: LTC, 2013.
- NEVES, C. **A estória do café.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1974.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações.** Rio de Janeiro: Interciências, 2003.

- NOGUEIRA, M. F. M. Biomassa Energética: Caracterização da Biomassa. **Palestra Proferida na I Escola de Combustão**, Florianópolis, 2007.
- OLIVEIRA, T. L. Dissertação de Mestrado - Análise energética e exergetica de biomassas como fonte energética sustentável em um Forno elétrico a arco. **Rede Temática em Engenharia de Materiais**, 2013.
- PASCOAL, L. N. **Aroma de café**. Dpaschoal: http://www.livrariacultura.com.br/busca;_lcid=PSoTd4-C384WvRxsRc578mAta, 2006.
- PAVLAS, M. E. A. Integrating renewable sources of energy into an existing combined heat and power system. **Energy**, v. 31, p. p. 2499-2511, 2006.
- PERA, H. **Geradores de Vapor**: um compêndio sobre a conversão de energia com vistas à preservação da ecologia. Sao Paulo: Fama, 1990.
- PHILLIPS, P. J. Coal preparation for combustion and conversion. **Gibbs and Hill**, New York, 2003.
- PIERCE, M. A. A history of cogeneration before PURPA. **ASHRAE Journal**, p. v. 37, n.5, p. 53-60, 1995.
- PINTO, L. R. Análise da Viabilidade da Geração de Energia Elétrica Descentralizada a partir de resíduos agrícolas no estado de Goiás e Estudo de Caso do Município de Rio Verde. **Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia)**, Itajubá, 2008. 136p.
- PNUD, P. D. N. U. P. O. D. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. São Paulo: Arcadis tetraplan, 2010.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2 ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.
- PUTMAN, R. E.; JARESCH, D. **The impact of air cooled condensers on plant design and operations**. [S.l.]: [s.n.], 2008.
- QUIRINO, W. F. Utilização Energética de Resíduos Vegetais, 2011. Disponível em: <<http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>>.
- REIS, L. B. D. **Geração de Energia Elétrica Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade**. Barueri. 2011.
- RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. **Combustão e Gaseificação de Biomassa Sólida - Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: [s.n.], 2008.
- RICHARDSON, R. J. et al. **Pesquisa Social: Metodos e Técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- RINO, G. Tecnologias de turbinas a vapor aplicadas a processo (TGM), 2008.
- RODRIGUES, M. L. D. M. Estudo técnico-econômico da implantação da cogeração em pequena escala a biomassa em uma indústria, Belo Horizonte, 2009.
- SANTOS, F. A. Análise da Aplicação da Biomassa da Cana como Fonte de Energia Elétrica: Usina de Açúcar, Etanol e Bioeletricidade. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, Sao Paulo, 2012.
- SANTOS, F. B.; NOVO, L. M. A. Monografia de conclusão de curso – UFRJ. **Fundamentos teóricos relacionados à cogeração e o exemplo da central de cogeração Infoglobo**, Rio de Janeiro, 2008.

- SANTOS, M. L. D. S. **Solid fuels combustion and gasification: modeling, simulation, and equipment operation.** New York: Marcel Dekker, 2004.
- SAVOLA, T.; FOGELHOLM, C.- J. Increased power to heat ratio of small scale CHP plants using biomass fuels and natural gás. **Energy Conversion and Management**, p. V.47, p.3105-3118, 2006.
- SAVOLA, T.; FOGELHOLM, C.-J. MINLP optimization model for increased power production in small-scale CHP plants. **Applied Thermal Engineering**, 27, 2007. 89-99.
- SAVOLA, T.; KEPPO, I. Off-design simulation and mathematical modeling of small-scale CHP plants at part loads. **Applied Thermal Engineering**, p. V.25, p.1219- 1232, 2005.
- SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **SEBRAE**, 17 março 2011. Disponível em: <<https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae>>.
- SIEMENS. Energy Siemens. **Siemens**, 30 março 2017. Disponível em: <<https://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/steam-turbines/sst-110.htm#content=Description>>.
- SILVA, J. N. et al. Vapor de água para aquecimento do ar de secagem de café: custos e consumo de energia. **Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, Poços de Caldas, 2000. p. 1151-1154.
- SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 6 edição. ed. [S.l.]: Egard Blucher Ltda, 2003.
- SOUZA, R. **Geografia do Brasil**. [S.l.]. 2013.
- TAUNAY, A. D. **História do café no Brasil: no Brasil Imperial 1822-1872**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional do Café, 1939.
- TEIR, S. Modern boilers types and applications. **In: ESPOO, 2002, Helsinki. Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering. Energy Engineering and Environmental Protection Publications**, 2002. 01-16.
- TOLLBOX, E. Mollier Diagram for Water-Steam. Disponível em: <http://www.engineeringtoolbox.com/mollier-diagram-water-d_308.html>. Acesso em: 31 março 2017.
- TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**, Rio de Janeiro, 2016.
- TOLMASQUIM, M. T. et al. Avaliação dos potenciais técnicos e econômicos e identificação das principais. **PROCEL/COPPE/PPE**, Rio de Janeiro, 1999.
- USA, D. O. E. **Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry**. [S.l.]. 2004.
- VALE, A. T. E. A. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), duke, 26 outubro 2007.
- VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. [S.l.]: Edgard Blücher, 1995.
- VIEIRA, A. C. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. **Dissertação (mestrado em Energia na Agricultura)**, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.
- VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: UFPR, 2001.

VLASSOV, D. Fundamentos de combustão. **Apostila**, Curitiba, 2008.

WIMMERSTEDT, R. Recent advances in biofuel drying. **Chemical Engineering and Processing**, p. V. 39, p. 441-447, 1999.

YUANDA BOLIER. Yuanda Bolier. **Yuanda Bolier**, 10 abril 2017. Disponível em: <http://www.yuanda-boiler.com/cpzx_detail/productId=74.html>.