

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS



SEGMENTO CADEIA SIDERÚRGICA

28.11.18

Pesquisa/Produto/Trabalho executado com recursos provenientes do Acordo de Empréstimo nº 8.095-BR, formalizado entre a República Federativa do Brasil e o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – Bird, em 1º de março de 2012.

Elaborado por:

Consultor Sênior: Dithelmo Kanto Filho

**Consultores Juniores: Thiago Mattos de Souza e
Mônica Blanco Olalla**

Estatístico: Teresa Aparicio Villegas

Coordenador do Projeto: Fernando Moreno Pinzón

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. PERFIL DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA	12
2.a. Comportamento da produção em nível de subsegmento e suas tendências	12
2.b. Informação do consumo de energia na cadeia siderúrgica e sua participação na demanda industrial	21
2.c. Indicadores que serão quantificados a partir da análise da realidade brasileira atual	22
3. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS PRINCIPAIS DO SEGMENTO INDUSTRIAL	24
3.a. Principais processos de produção do subsegmento Pelotização.....	24
3.b. Principais processos de produção do subsegmento Produção de Gusa.....	29
3.c. Principais processos de produção do subsegmento Produção de Aço via plantas integradas a carvão mineral e a carvão vegetal	33
3.d. Principais processos de produção do subsegmento Produção de Aço via plantas que essencialmente reaproveitam sucata metálica	41
4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO	45
4.a. Seleção da amostra da pesquisa	45
4.b. Seleção das etapas do processo de produção	46
4.c. Tratamento de dados.....	46
5. INDICADORES DE CONSUMO ENERGÉTICO POR SUBSEGMENTO.....	47
5.a. Subsegmento Pelotização.....	47
5.a.i. Situação atual.....	47
5.a.ii Condições com tecnologias mais eficientes	54
5.b. Subsegmento Produção de Gusa	64
5.b.i. Situação atual.....	64
5.b.ii. Condições com tecnologias mais eficientes	73
5.c. Subsegmento de Produção de Aço via Plantas Integradas a Carvão Mineral e a Carvão Vegetal e Plantas que Essencialmente Reaproveitam Sucata Metálica para a Produção de Aço	82
5.c1 Subsegmento Produção de Aço via Plantas Integradas (Rota 1).....	82
5.c1.i. Situação atual	82
5.c1.ii. Condições com tecnologias mais eficientes	94
5.c2 Subsegmento Produção de Aço via Plantas Integradas (Rota 2 a carvão vegetal).....	116
5.c2.i. Situação atual	116
5.c2.ii. Condições com tecnologias mais eficientes	125

5.c3 Subsegmento Produção de Aço via Plantas Integradas (Rota 2 a coque metalúrgico sem coqueria)	131
5.c3.i. Situação atual	131
5.c3.ii. Condições com tecnologias mais eficientes	139
5.c4 Subsegmento Produção de Aço via plantas que reaproveitam sucata.....	146
5.c4.i. Situação atual	146
5.c4.ii. Condições com tecnologias mais eficientes	153
6. ANÁLISE DE CONDICIONANTES À PENETRAÇÃO DE TECNOLOGIAS EFICIENTES DE ENERGIA POR SUBSEGMENTO	169
6.a. Subsegmento Pelotização.....	170
6.a.i. Condicionantes técnicos	170
6.a.ii. Condicionantes econômico-financeiros	170
6.b. Subsegmento Produção de Gusa	171
6.b.i. Condicionantes técnicos	171
6.b.ii. Condicionantes econômico-financeiros	171
6.c. Subsegmento Produção de Aço via plantas integradas	172
6.c.i. Condicionantes técnicos.....	172
6.c.ii. Condicionantes econômico-financeiros.....	173
6.d. Subsegmento produção de aço via plantas integradas que reaproveitam sucata	174
6.d.i. Condicionantes técnicos	174
6.d.ii. Condicionantes econômico-financeiros	174
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	175
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	178

Lista de Tabelas

Tabela 1: Evolução da produção de aço bruto por países em Mt.....	15
Tabela 2: Evolução da produção de aço bruto na América Latina por países em Kt	16
Tabela 3: Destinos do ferro-gusa exportado pelo Brasil	18
Tabela 4: Consumos específicos médios dos subsegmentos da cadeia siderúrgica.....	21
Tabela 5: Distribuição de motores nas etapas produtivas na produção de pelotas.	48
Tabela 6: Distribuição por serviço energético no segmento de pelotização	49
Tabela 7: Consumo específico de energia elétrica por etapa	49
Tabela 8: Consumo específico de energia térmica por etapa no forno de pelotização	50
Tabela 9: Indicadores de rendimento energético atuais, do subsegmento de Pelotização ...	50
Tabela 10: Coeficientes de destinação atuais, do subsegmento de Pelotização	52
Tabela 11: Investimentos necessários para reposição de equipamentos com tecnologia similar	53
Tabela 12: Investimentos Motores Standards	53
Tabela 13: Investimentos Lâmpadas de uso atual	53
Tabela 14: Consumo específico de energia elétrica por etapa após implementação de projetos de retrofit e eficiência energética.....	59
Tabela 15: Consumo específico de energia térmica após implementação de medidas de economia no forno	59
Tabela 16: Indicadores de rendimento energético na situação alternativa, do subsegmento de Pelotização.....	60
Tabela 17: Coeficientes de destinação na situação alternativa, do subsegmento de Pelotização	61
Tabela 18: Investimentos Motores de Alta Eficiência	61
Tabela 19: Investimentos Lâmpadas tipo LED.....	62
Tabela 20: Lista de projetos em fase de pré-viabilidade da amostra	62
Tabela 21: Investimento do subsegmento de pelotização	63
Tabela 22: Potencial de economia do segmento de pelotização	63
Tabela 23: Fontes de energia utilizadas na produção de Gusa.....	66
Tabela 24: Distribuição das etapas de processo nas unidades de serviço de produção de ferro-gusa	67
Tabela 25: Consumos específicos do subsegmento de Gusa, valores mínimos, médios e máximos	67
Tabela 26: Indicadores de rendimento energético atuais, do subsegmento de Produção de Gusa	68
Tabela 28: Coeficientes de destinação atuais, do subsegmento de produção de Gusa	71
Tabela 29: Investimentos necessários para reposição de equipamentos com tecnologia similar	72
Tabela 30: Medidas de eficiência energética identificadas para o subsegmento de Gusa.....	73
Tabela 31: Rendimento mínimo para motores de alta eficiência	76
Tabela 32: Equivalência entre lâmpadas LED e convencionais	77
Tabela 33: Consumos específicos melhorados do subsegmento de Gusa	78
Tabela 34: Indicadores de rendimento energético situação com tecnologias mais eficientes, do subsegmento de produção de Gusa.....	79
Tabela 35: Coeficientes de destinação da situação com tecnologias mais eficientes, do subsegmento de produção de Gusa	80
Tabela 36: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência.....	81
Tabela 37: Potencial de economia do subsegmento de gusa	81

Tabela 38: Distribuição de consumo total de energia na Rota 1, em GJ/t de aço bruto	83
Tabela 39: Distribuição de produção de energia na Rota 1, em GJ/t de aço bruto	84
Tabela 40: Distribuição de consumo de energia na Rota 1, em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar as etapas de transformação	85
Tabela 41: Distribuição de produção energética na Rota 1, em GJ/t de aço bruto, após a eliminação das etapas de transformação	85
Tabela 42: Consumo final de energia para produção de aço na Rota 1, em GJ/t de aço bruto	86
Tabela 43: Consumo final de energia para produção de aço na Rota 1, em GJ/t de aço bruto, após nomenclatura adequada para o BEU	87
Tabela 44: Distribuição por serviço energético na Rota 1	88
Tabela 45: Balanço energético do processo de sinterização, em Mcal/h	90
Tabela 46: Balanço energético do processo do alto-forno	91
Tabela 47: Balanço térmico do conversor LD	91
Tabela 48: Rendimento energético por serviço energético da Rota 1, em %	93
Tabela 49: Coeficiente de destinação por serviço energético da Rota 1, em %	94
Tabela 50: Critérios de aplicabilidade das medidas	95
Tabela 51: Medidas de eficiência energética para a etapa produtiva de coqueria	95
Tabela 52: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de sinterização	98
Tabela 53: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de alto-forno	100
Tabela 54: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de aciaria	103
Tabela 55: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de laminação	104
Tabela 56: Medidas de eficiência energética gerais para o subsegmento de produção de aço via plantas integradas	106
Tabela 57: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1	108
Tabela 58: Consumo específico da etapa de sinterização da Rota 1	108
Tabela 59: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1	109
Tabela 60: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1	109
Tabela 61: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1	109
Tabela 62: Consumo específico da etapa de aciaria da Rota 1	110
Tabela 63: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1	110
Tabela 64: Consumo específico da etapa de laminação da Rota 1	110
Tabela 65: Rendimento energético por serviço energético, em %	111
Tabela 66: Coeficiente de destinação por serviço energético, em %	112
Tabela 67: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de coqueria	113
Tabela 68: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de sinterização	113
Tabela 69: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de alto-forno	114
Tabela 70: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de aciaria	114
Tabela 71: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de laminação	115
Tabela 72: Medidas gerais de eficiência energética para a usinas integradas	115
Tabela 73: Potencial de economia do subsegmento de aço, Rota 1	116
Tabela 74: Distribuição de consumo total de energia na Rota 2, em GJ/t de aço bruto	117
Tabela 75: Distribuição de produção energética na Rota 2, em GJ/t de aço bruto	117

Tabela 76: Distribuição de consumo energético na Rota 2 em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar as etapas de transformação	118
Tabela 77: Distribuição de produção energética na Rota 2, em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar as etapas de transformação	118
Tabela 77: Distribuição de consumo energético na Rota 2 em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar a produção de energético na etapa do alto-forno.	119
Tabela 73: Distribuição de consumo energético na Rota 2 a carvão vegetal, em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar a etapa de sinterização e os energéticos carvão mineral e coque metalúrgico	120
Tabela 74: Consumo final para produção de aço na Rota 2 (carvão vegetal), após nomenclatura adequada para o BEU, em GJ/t de aço bruto	121
Tabela 81: Distribuição de serviço energético na Rota 2	122
Tabela 76: Rendimento energético por serviço energético da Rota 2 (carvão vegetal), em %	123
Tabela 77: Coeficiente de destinação por serviço energético da Rota 2, em %	124
Tabela 78: Consumo específico da etapa de pelletização da Rota 2	126
Tabela 79: Consumo específico da etapa de alto-forno da Rota 2	126
Tabela 80: Consumo específico da etapa de aciaria da Rota 2	127
Tabela 81: Consumo específico da etapa de laminação da Rota 2	127
Tabela 82: Rendimento energético por serviço energético, em %	128
Tabela 83: Rendimento energético por serviço energético, em %	129
Tabela 84: Potencial de economia do subsegmento de aço, Rota 2 a carvão vegetal	130
Tabela 85: Distribuição de consumo energético na Rota 2, em GJ/t de aço bruto	132
Tabela 86: Distribuição de produção energética na Rota 2, em GJ/t de aço bruto	132
Tabela 87: Distribuição de consumo energético na Rota 2, em GJ/t de aço bruto	133
Tabela 88: Distribuição de produção energética na Rota 2, em GJ/t de aço bruto	133
Tabela 89: Distribuição de consumo energético na Rota 2, em GJ/t de aço bruto, após a eliminação das etapas de transformação	134
Tabela 96: Distribuição de consumo energético na Rota 2 a coque metalúrgico, em GJ/t de aço bruto, após desconsiderar a etapa de pelletização e o energético carvão vegetal	135
Tabela 97: Consumo final para produção de aço na Rota 2, após nomenclatura adequada para o BEU, em GJ/t de aço bruto	136
Tabela 98: Distribuição por serviço energético na Rota 2	137
Tabela 93: Rendimento energético por serviço energético da Rota 2 (coque metalúrgico), em %	138
Tabela 94: Coeficiente de destinação por serviço energético da Rota 2, em %	139
Tabela 95: Consumo específico da etapa de sinterização da Rota 2	141
Tabela 96: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 2	141
Tabela 97: Consumo específico da etapa de aciaria da Rota 2	141
Tabela 98: Consumo específico da etapa de laminação da Rota 2	142
Tabela 99: Rendimento energético por serviço energético, em %	143
Tabela 100: Coeficiente de destinação por serviço energético, em %	144
Tabela 101: Potencial de economia do subsegmento de aço, Rota 2 a carvão/coque metalúrgico	145
Tabela 102: Distribuição de consumo total de energia na Rota 3, em GJ/t de aço bruto ...	147
Tabela 103: Distribuição de consumo final de energia na Rota 3 em GJ/ t de aço bruto, após a desconsiderar os insumos não enérgéticos	147

Tabela 104: Distribuição de consumo final de energia na Rota 3, em GJ/t de aço bruto, após nomenclatura adequada para o BEU	148
Tabela 105: Distribuição de serviço energético na Rota 3	149
Tabela 106: Balanço térmico de um forno elétrico a arco, em kwh/t de aço	150
Tabela 113: Rendimento energético por serviço energético da Rota 3, em %	152
Tabela 114: Coeficiente de destinação por serviço energético da Rota 3, em %	153
Tabela 115: Siglas de aplicabilidade das tecnologias.....	154
Tabela 116: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de aciaria	155
Tabela 117: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de laminação.....	159
Tabela 118: Medidas gerais de eficiência energética para as usinas semi-integradas.....	161
Tabela 119: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 3	162
Tabela 120: Consumo específico da etapa de aciaria da Rota 3.....	163
Tabela 115: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 3	163
Tabela 116: Consumo específico da etapa de laminação da Rota 3.....	163
Tabela 117: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 3	164
Tabela 118: Consumo específico da etapa de outros total da Rota 3.....	164
Tabela 119: Rendimento energético por serviço energético, em %	165
Tabela 120: Rendimento energético por serviço energético, em %	166
Tabela 127: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência para etapa de aciaria	167
Tabela 128: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência para etapa de laminação	167
Tabela 129: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência para as usinas semi-integradas	168
Tabela 130: Potencial de economia do segmento de aço referente a Rota 3.....	168

Lista de Figuras

Figura 1: Processo geral da indústria siderúrgica.....	12
Figura 2: Movimento do pellet feed no disco de pelotização.....	26
Figura 3: Desenho esquemático do forno de pelotização de grelha móvel	27
Figura 4: Fluxograma do processo de produção de pelotas	28
Figura 5: Esquema de produção de ferro-gusa.....	29
Figura 6: Desenho esquemático do alto-forno.....	30
Figura 7: Equipamentos auxiliares do alto-forno.....	31
Figura 8: Lingotamento do ferro-gusa.....	32
Figura 9: Rota de produção em unidades integradas a coque (alto-forno e lingotamento direto).....	33
Figura 10: Diagrama de blocos do processo de sinterização	35
Figura 11: Fluxograma do processo de Aciaria LD	36
Figura 12: Desenho esquemático do Conversor LD.....	37
Figura 13: Sequência de operação do conversor LD	37
Figura 14: Desenho esquemático da adição de ferros-ligas	38
Figura 15: Máquina de lingotamento contínuo	39
Figura 16: Tipos de laminadores.....	40
Figura 17: Rota de produção a partir de aciaria elétrica (EAF).....	41
Figura 18: Forno elétrico a arco direto	42
Figura 19: Desenho esquemático de um forno panela	43
Figura 20: Comparação dos fluxogramas da fabricação de aço através do forno elétrico convencional e o forno panela.....	44
Figura 21: Fluxograma simplificado do processo produtivo de pelotização	47
Figura 22: Fluxograma do processo de produção de ferro-gusa simplificado.....	65
Figura 23: Saída de energia do glendon	69
Figura 24: Balanço energético em unidades originais para produção de 1 ton de ferro-gusa.....	70
Figura 25: Diagrama de blocos simplificado do processo produtivo das plantas de aço integradas com coqueria.....	83
Figura 26: Balanço energético do processo de sinterização	89
Figura 27: Balanço energético do processo do alto-forno, em GJ/t.....	90
Figura 28: Diagrama de blocos simplificado do processo produtivo das plantas de aço integradas sem coqueria.....	116
Figura 29: Diagrama de blocos simplificado do processo produtivo das plantas de aço integradas de coque metalúrgico sem coqueria.....	131
Figura 30: Balanço térmico de um forno elétrico a arco	150

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Produção mundial de aço bruto de 2010 até 2016	14
Gráfico 2: Evolução da produção de aço bruto por países em Mt.....	15
Gráfico 3: Evolução da produção de aço bruto na América Latina por países em Kt.....	16
Gráfico 4: A indústria siderúrgica brasileira 2005-2015	17
Gráfico 5: Destinos do ferro-gusa exportado pelo Brasil, Kt.....	19
Gráfico 6: Participação nas exportações brasileiras 2015-2016	19
Gráfico 7: Panorama mundial dos fornos em operação da produção de pelotas	27
Gráfico 8: Variação do rendimento do forno de reaquecimento de tarugos para laminação .	92

1. INTRODUÇÃO

Descrição geral do objetivo do relatório

O presente relatório tem como objetivo identificar e avaliar a eficiência energética nas indústrias da cadeia siderúrgica, bem como a geração de dados básicos relativos ao uso de energia (elétrica e térmica) através da realização de pesquisa em âmbito nacional.

O estudo, inicialmente, caracteriza este segmento sob os pontos de vista técnico, econômico, energético e ambiental e, em seguida, é mostrada a metodologia utilizada para o cálculo dos potenciais de conservação de energia e comparados os resultados com os encontrados na literatura técnica. São comentadas, por fim, algumas barreiras existentes para as ações de conservação de energia na indústria siderúrgica.

Abrangência deste relatório

O alcance deste estudo no segmento da cadeia siderúrgica, está definido para os seguintes subsegmentos: pelletização e sinterização, produção de gusa, produção de aço via plantas integradas a carvão mineral e a carvão vegetal, e plantas que essencialmente reaproveitam sucata metálica para a produção de aço.

O estudo aborda os seguintes temas específicos:

- Descrição do processo produtivo de cada subsegmento;
- Consumo de energia na cadeia siderúrgica e sua participação na demanda industrial;
- Consumo de energia de cada subsegmento e sua distribuição fonte-uso;
- Indicadores de consumo energético em cada subsegmento nas condições da situação atual de produção;
- Indicadores de consumo energético em cada subsegmento considerando a utilização de tecnologias mais eficientes;
- Análise dos condicionantes de penetração de tecnologias eficientes de energia por subsegmento;
- Conclusões gerais do estudo.

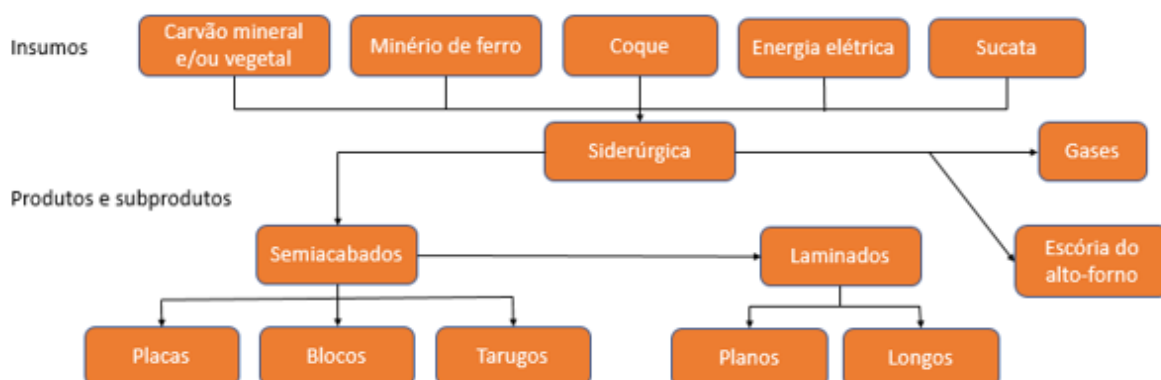
2. PERFIL DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA

2.a. Comportamento da produção em nível de subsegmento e suas tendências

A indústria siderúrgica é um setor relevante no desenvolvimento econômico de um país devido às múltiplas aplicações do aço, principalmente na construção e no transporte, cada vez mais diversificadas na sociedade moderna, e também por produzir uma importante parte da produção nacional, sendo fornecedora de matérias-primas para outros setores da indústria de transformação, na participação no PIB e na geração de empregos (VIANA, F. L., 2017).

A siderúrgica é a metalurgia do ferro, que consiste no processo de transformação da matéria-prima do mineral do ferro, em aço. A cadeia siderúrgica se caracteriza por grandes empresas que operam nas diferentes etapas do processo produtivo, desde a transformação do minério em ferro primário, até a produção de transformados, para aplicação em produtos na indústria automotiva, de bens de capital, naval ou de linha branca (VIANA, F. L., 2017).

O processo geral da indústria siderúrgica pode ser visualizado na Figura 1.



Fonte: VIANA, F. L. (2017)

Figura 1: Processo geral da indústria siderúrgica

As principais indústrias e setores demandantes da cadeia siderúrgica são:

- Material de transporte (automobilística, ferroviária e naval);
- Máquinas e equipamentos;
- Construção civil (vergalhões, barras, perfis e trilhos);
- Cimenteira;
- Eletrodomésticos (linhas brancas).

No panorama mundial, fatores econômicos e socioambientais têm prejudicado a dinâmica mundial da siderurgia, assim como acontece com outros setores da indústria, o que gera grandes desafios para o setor. Dentre eles estão:

- A grande expansão da capacidade produtiva siderúrgica, com o crescimento da concorrência e da pressão em cima do preço de insumos na última década;
- O aumento da pressão exercida para reduzir os impactos ambientais, dentro de um contexto com mais exigência por qualidade de vida;
- O aumento e a incerteza em cima dos preços de energia, no âmbito mundial.

Outro fator preocupante no setor é em relação a capacidade instalada, a indústria siderúrgica possui uma grande capacidade ociosa, geralmente operando com o Nível de Utilização da Capacidade Instalada (NUCI) acima de 85%. O que gera maior competição entre os mercados consumidores, além de grande pressão em cima dos preços dos insumos e do produto final (BNDES, 2012).

Por outro lado, a indústria siderúrgica devido as pressões sociais e legislativas na década de 1980, vem se tornando mais eficiente e sustentável, através da reciclagem de produtos, diminuindo, assim, o consumo específico de energia (BNDES, 2012).

A mudança de processos e o surgimento de novas tecnologias ajudam a reduzir o impacto ambiental, com a eliminação de algumas etapas. Existe uma tendência mundial para compactar as plantas siderúrgicas, com o intuito de se utilizar ainda mais a sucata reciclável e flexibilizar os processos. Isso explica a maior utilização de aciarias elétricas nas plantas semi-integradas.

Eficiência energética e emissões

A busca por alternativas tecnológicas e operacionais tem sido, constantemente, usada na indústria do aço para aumento da eficiência energética. Nos últimos 50 anos, teve-se uma redução de 60% no consumo energético por tonelada produzida. Por causa dessa considerável queda, a diminuição do consumo de energia tem acontecido a taxas declinantes, nos últimos anos, o que tornará os ganhos de eficiência cada vez mais difíceis de serem obtidos, com as tecnologias já existentes (BNDES, 2012).

As indústrias siderúrgicas brasileiras, nos últimos anos, desenvolveram uma série de ações para se obter a redução do consumo energético na operação, destacando (BNDES, 2012):

- A cogeração de energia elétrica por meio do reaproveitamento de gases do processo;
- A substituição de insumos/combustíveis;
- A otimização do controle dos processos via automação;
- Os programas de treinamento/sensibilização de fornecedores.

A siderurgia brasileira ainda pode ter um melhor aproveitamento dos gases de alto-forno e de aciaria, que são encontrados em 90% e 70%, respectivamente. Vale ressaltar que, quanto mais se reaproveitar os gases, menor será o consumo de insumos não renováveis durante a produção, além de poder ocorrer a cogeração de energia elétrica (BNDES, 2012).

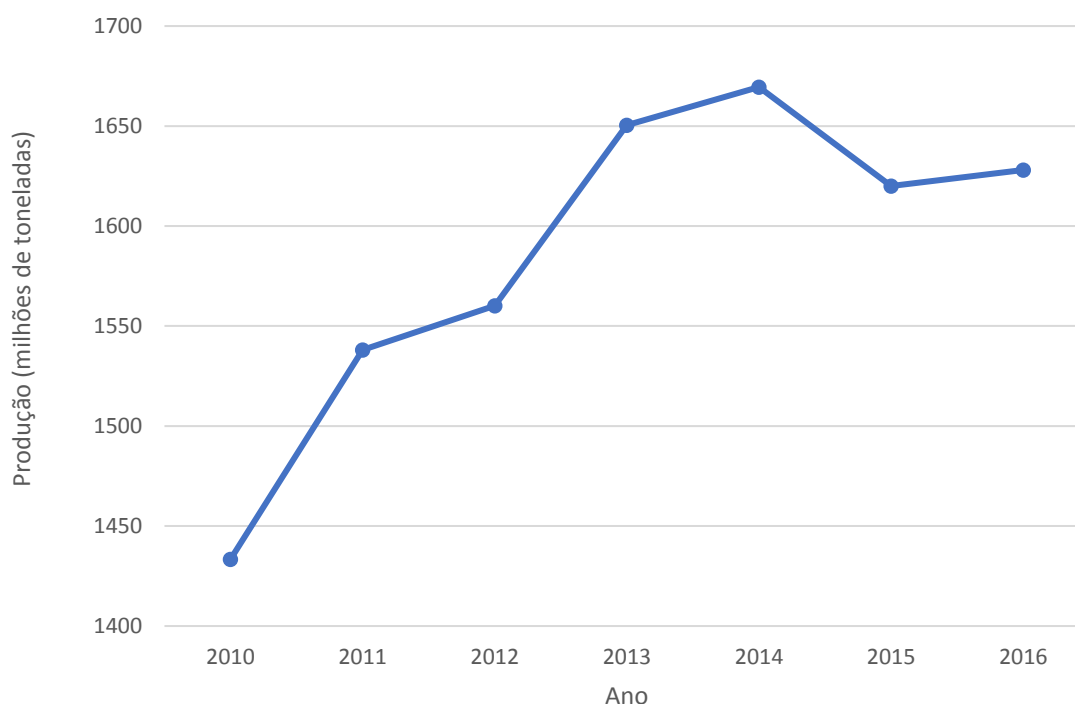
Todavia, é previsto que nos próximos anos, o setor siderúrgico brasileiro terá, além da pressão competitiva atual, uma alta nos preços de energia elétrica com relação à média dos principais países produtores.

Em relação aos fatores que possuem impacto na competição dos produtores brasileiros estarão a taxa de câmbio e a alta tributação. Com isso, as indústrias do setor deverão diminuir seus custos e aumentar a competitividade, buscando alternativas para reduzir o consumo energético e o volume de emissões.

Produção de aço

De acordo com o Instituto Aço Brasil (IABr), a indústria siderúrgica brasileira obteve uma produção de 31,3 milhões de toneladas de aço bruto em 2016. Já a produção de produtos siderúrgicos atingiu 30,2 milhões de toneladas nesse mesmo ano (VIANA, F. L., 2017).

Conforme o World Steel Association (2017), a produção mundial de aço bruto atingiu 1,63 bilhões de toneladas no ano de 2016, com a produção concentrada na Ásia (VIANA, F. L., 2017).

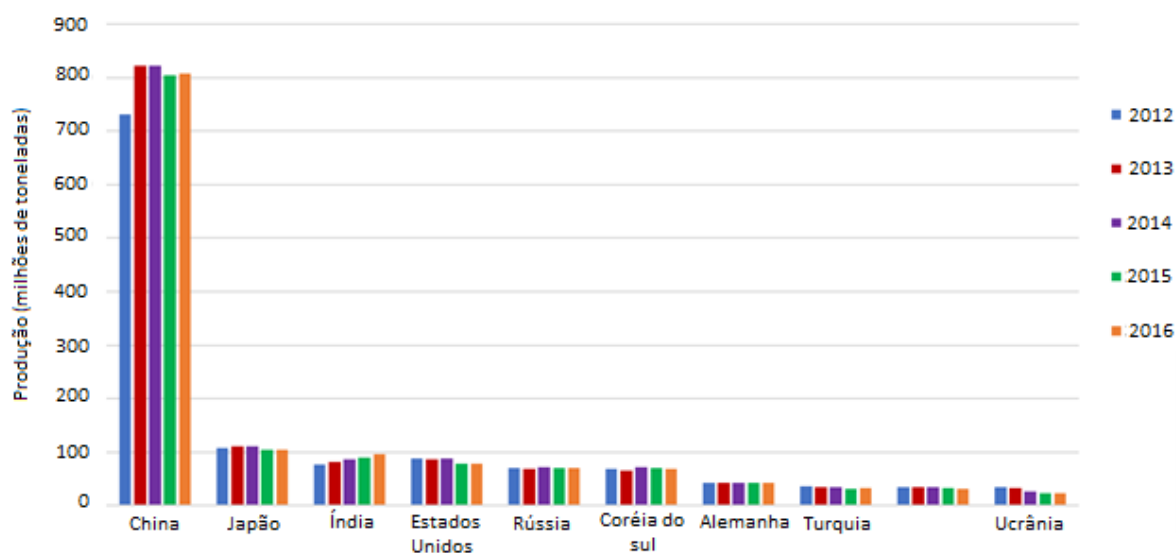


Fonte: Elaboração própria com dados da WORLD STEEL ASSOCIATION (2017)

Gráfico 1: Produção mundial de aço bruto de 2010 até 2016

Segundo dados do SICETEL (2016), existe um excedente da capacidade mundial de produção de aço que ultrapassa 700 milhões de toneladas, dessa forma a indústria do aço mundial utiliza um índice de ocupação menor que 70% da capacidade instalada.

O Gráfico 2 e a Tabela 1 mostram a evolução dos principais produtores de aço no cenário mundial. Pode ser observado que a China (maior produtora), com aproximadamente 50% da produção de aço mundial, produz quase 8 vezes mais que o Japão, que é o segundo maior produtor mundial (SICETEL, 2016).



Fonte: Elaboração própria com dados do SICETEL (2016) e ALACERO (2017)
Gráfico 2: Evolução da produção de aço bruto por países em Mt

Países	2012	2013	2014	2015	2016
China	731	822	823	804	808
Japão	107	111	111	105	105
Índia	77	81	87	90	96
Estados Unidos	89	87	88	79	79
Rússia	70	69	72	71	71
Coreia do Sul	69	66	72	70	69
Alemanha	43	43	43	43	42
Turquia	36	35	34	32	33
Brasil	35	34	34	33	31
Ucrânia	35	33	27	23	24

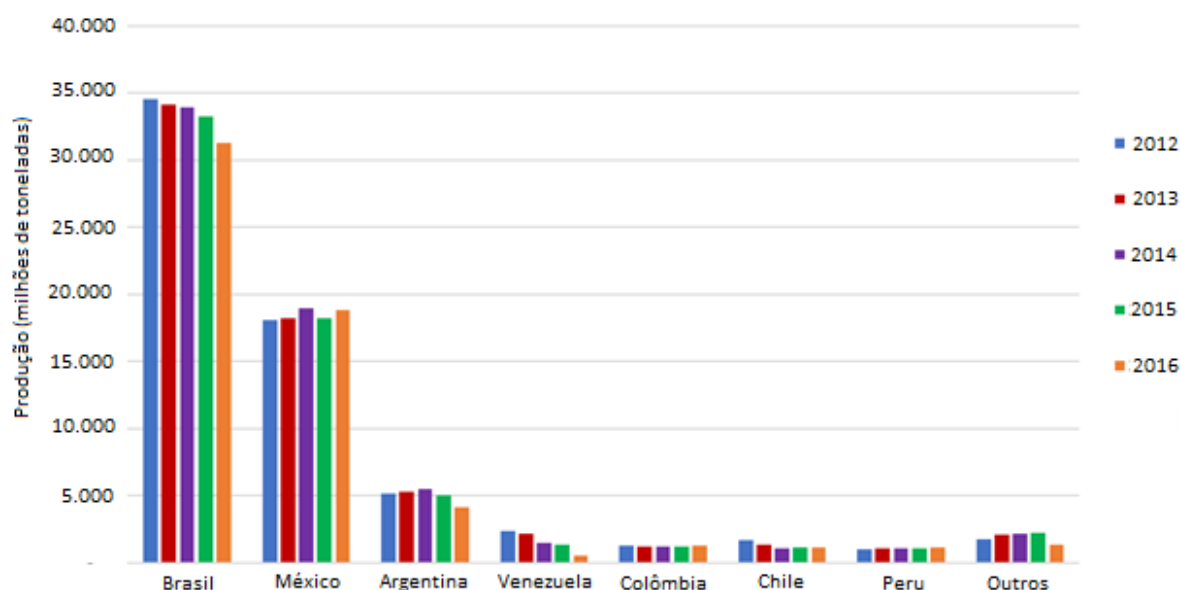
Fonte: Elaboração própria com dados do SICETEL (2016) e ALACERO (2017)
Tabela 1: Evolução da produção de aço bruto por países em Mt

A forte presença da China no panorama da indústria siderúrgica, resulta em uma grande desvantagem para o resto de países competidores, que acostumados a trabalhar numa economia de mercado capitalista, encontram grandes dificuldades para competir com essa indústria que apresenta ativos atualizados, elevada escala, câmbio depreciado e uma forte participação do Estado. Como consequência, foi iniciada uma crescente abertura de

processos “antidumping” contra o aço chinês de diversos países, inclusive no Brasil (SICETEL, 2016).

Na América Latina, a indústria siderúrgica entre 2000 e 2016, teve a produção estagnada entre 63 e 67 milhões de toneladas/ano. Em 2015, a produção caiu 3% em relação ao ano anterior, e em 2016 caiu mais 6% (SICETEL, 2016).

O Gráfico 3 e a Tabela 2 mostram que o Brasil conserva o primeiro lugar na produção de aço da América Latina, produzindo mais de 50% do total, seguido por México e Argentina (SICETEL, 2016).



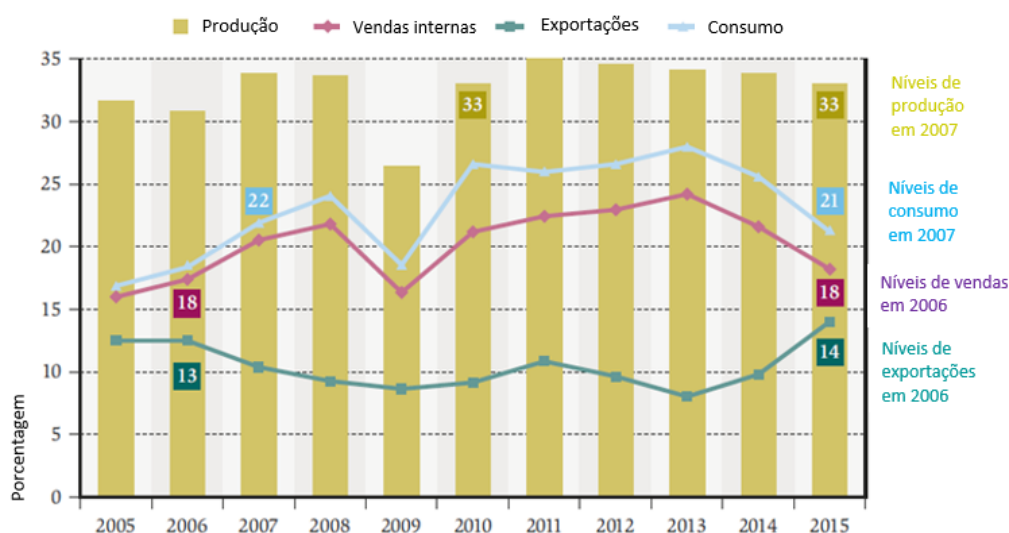
Fonte: Elaboração própria com dados do SICETEL (2016) e ALACERO (2017)
Gráfico 3: Evolução da produção de aço bruto na América Latina por países em Kt

Países	2012	2013	2014	2015	2016
Brasil	34.524	34.163	33.897	33.256	31.275
México	18.095	18.208	18.995	18.227	18.811
Argentina	5.170	5.273	5.488	5.030	4.126
Venezuela	2.359	2.179	1.485	1.344	553
Colômbia	1.302	1.236	1.208	1.212	1.272
Chile	1.670	1.323	1.079	1.112	1.153
Peru	981	1.069	1.078	1.082	1.168
Outros	1.788	2.105	2.166	2.265	1.365
Total	65.889	65.556	65.396	63.528	59.723

Fonte: Elaboração própria com dados do SICETEL (2016) e ALACERO (2017)
Tabela 2: Evolução da produção de aço bruto na América Latina por países em Kt

No Brasil, a indústria siderúrgica experimenta a pior crise da sua história, causada pela profunda crise na economia brasileira, que, em consequência, prejudica a competência internacional e um excedente de oferta de aço no mercado mundial (ALACERO, 2016).

Os efeitos da crise econômica sob os principais indicadores de atividade no setor são mostrados no Gráfico 4, que ressalta a forte queda do consumo interno e as vendas a partir do ano de 2013. A queda da produção foi menos drástica porque houve um aumento no volume das exportações impulsionado pela forte desvalorização do real. No entanto, devido à queda dos preços internacionais do aço, o faturamento em dólares das exportações foi 3,3% menor ao do ano anterior. Ao final, todos os resultados de 2015 retrocederam a níveis similares aos alcançados nos inícios de 2006-2007 (ALACERO, 2016).



Fonte: ALACERO (2016)

Gráfico 4: A indústria siderúrgica brasileira 2005-2015

Em 2016, a produção de aço bruto no Brasil caiu 6% comparado com o ano anterior, porém o país continuou como nono produtor mundial (SICETEL, 2016).

Segundo o Relatório de Sustentabilidade do IABr (2016), em 2015, as usinas brasileiras operaram, em média, com 68% da capacidade instalada de produção. Sendo que, para alcançar uma rentabilidade mínima de funcionamento, essas devem operar sempre acima de 80% da capacidade instalada.

A baixa rentabilidade do setor siderúrgico, junto com o crescente excedente de capacidade, interna e externa, provocaram contínuos adiamentos dos investimentos do setor no Brasil. Nessa situação, as empresas siderúrgicas brasileiras estão altamente estancadas e priorizando a redução de custos e do endividamento (ALACERO, 2016).

Produção de ferro-gusa

No Brasil, a produção total de ferro-gusa, em 2016, foi de 28,3 milhões de toneladas, 11,7% mais baixa do que em 2015, quando foram produzidas 32,1 milhões de toneladas. As usinas integradas respondem aproximadamente por 85% da produção brasileira de ferro-gusa, enquanto os outros 15% são produzidos pelas usinas independentes (SINDIFER, 2016).

O setor independente de produção não cativa, de gusa a carvão vegetal, congrega uma capacidade total estimada em 15 milhões de toneladas anuais de produção de gusa, que hoje opera a apenas 25% da capacidade nominal informada. O recorde de produção de gusa aconteceu em 2004, quando a ocupação da capacidade chegou a quase 70% (CGEE, 2014).

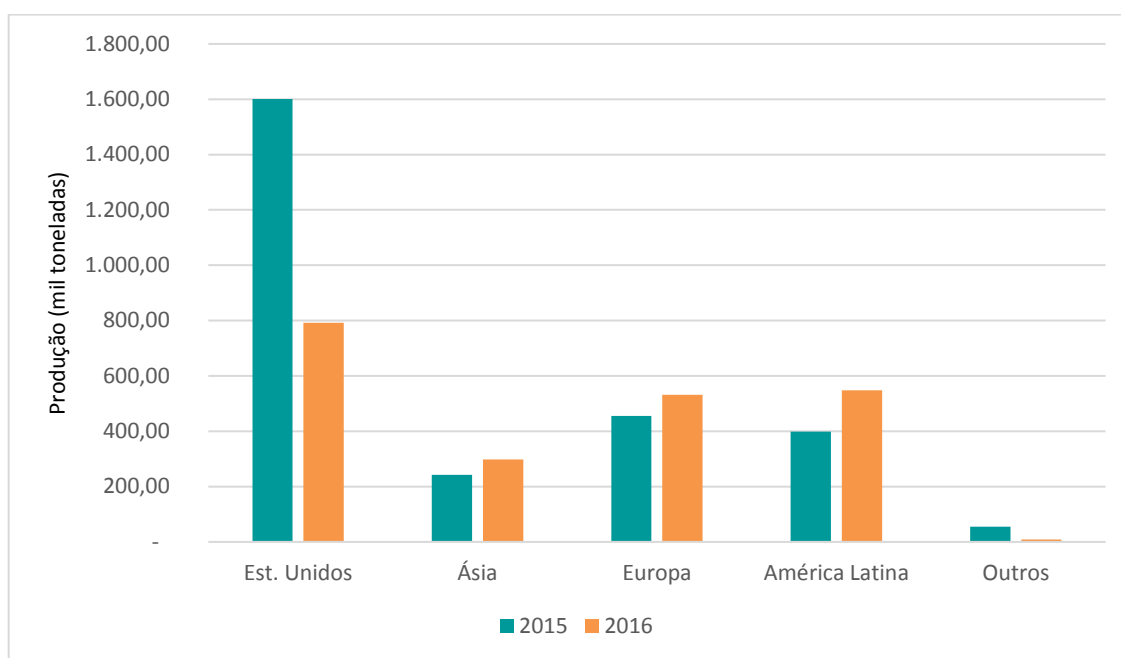
As exportações são realizadas apenas pelos produtores independentes de ferro-gusa, que exportam 60% da sua produção, pois as usinas integradas destinam o ferro-gusa totalmente para a fabricação do aço (DEPEC, 2017).

No Anuário Estatístico do SINDIFER (2016), os Estados Unidos, a Europa e a América Latina aparecem como os principais destinos de exportação do ferro-gusa brasileiro. Os dados das exportações em 2015 e 2016 são mostrados na Tabela 3 e nos Gráfico 5 e 6.

País/Região	Quantidade (1000t) / Participação				Evolução	
	2015	Partic/15	2016	Partic/16	2016-2015	%
Est. Unidos	1.601,20	58,2%	792,00	36,3%	-809,20	-50,5%
Ásia	242,00	8,8%	297,50	13,7%	55,50	22,9%
Europa	454,90	16,5%	531,50	24,4%	76,60	16,8%
América Latina	398,20	14,5%	548,10	25,2%	149,90	37,6%
Outros	55,30	2,0%	8,60	0,4%	-46,70	-84,4%
TOTAL	2.751,60		2.177,70		-573,90	-20,9%

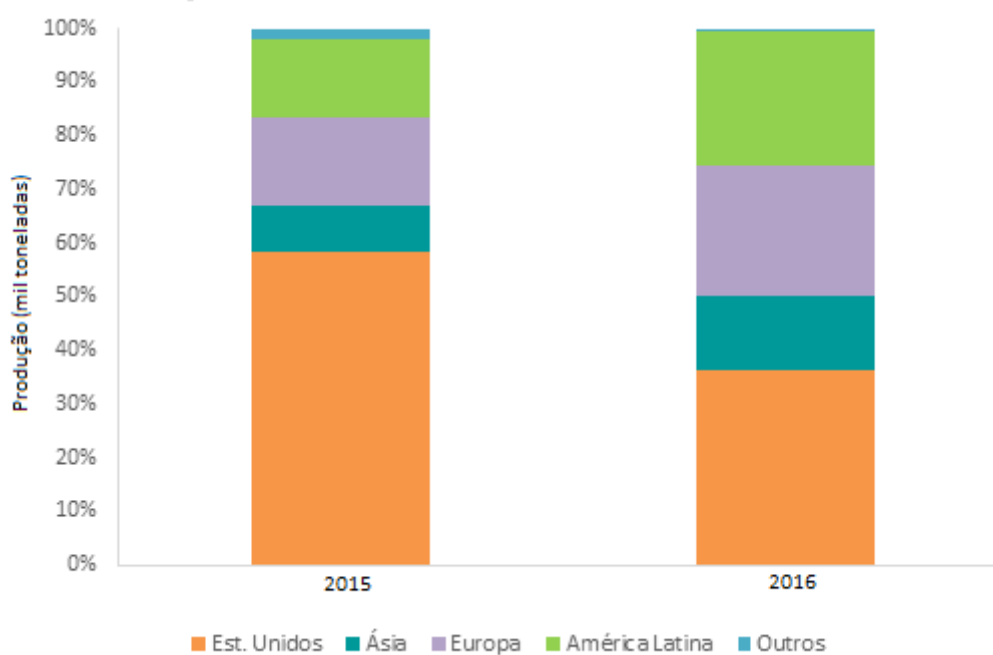
Fonte: SINDIFER (2016)

Tabela 3: Destinos do ferro-gusa exportado pelo Brasil



Fonte: SINDIFER (2016)

Gráfico 5: Destinos do ferro-gusa exportado pelo Brasil, Kt



Fonte: SINDIFER (2016)

Gráfico 6: Participação nas exportações brasileiras 2015-2016

Produção de pelotas

A capacidade instalada brasileira gira em torno de 90 milhões de toneladas anuais de pelotas, proveniente das usinas (EPE, 2017):

- VALE (Tubarão I e II, Hispanobrás, Itabrasco, Nibrasco e Kobrasco), com capacidade de 30 milhões t/ano;
- Samarco (VALE e BHP Billiton, atualmente com as operações paradas), com capacidade de 30 milhões t/ano;
- Ferteco, com capacidade de 11,5 milhões t/ano;
- VALE (Maranhão, Minas Gerais), com capacidade, respectivamente, de 7,5 e 12 milhões t/ano.

Em 2017, a produção anual de pelotas da VALE conquistou um recorde de 50,3 milhões de toneladas, um aumento de 8,8% com relação ao ano de 2016, ano em que o recorde foi de 46,2 milhões de toneladas, principalmente por causa da maior produtividade e do menor número de paradas programadas de manutenção (VALE, 2018).

2.b. Informação do consumo de energia na cadeia siderúrgica e sua participação na demanda industrial

Em 2016, o setor industrial foi responsável por 33% do consumo energético total do país e a indústria siderúrgica foi responsável por 17,8% desse consumo energético industrial, o que revela a importante característica eletro-intensiva desta indústria (BEN, 2017).

O consumo médio de energia varia para cada subsegmento dentro da cadeia siderúrgica.

A siderurgia é um segmento de grande intensidade energética na indústria e inúmeros fatores afetam seu consumo específico de energia, como (EPE, 2009):

- Rota tecnológica e os processos utilizados;
- Tipo e qualidade dos materiais e energéticos utilizados;
- Mix de produtos produzidos.

Subsegmento	Consumo Específico Médio	
	GJ/t	tep/t
Pelotização	1,05	0,03
Ferro-gusa	12,20	0,29
Aço (via plantas integradas)	24,00	0,57
Aço (via plantas semi-integradas)	9,76	0,23

Fonte: Elaboração própria com os dados do IABr (2018) e da EPE (2009)

Tabela 4: Consumos específicos médios dos subsegmentos da cadeia siderúrgica

A Tabela 4 mostra os consumos específicos médios de cada subsegmento da cadeia siderúrgica. A produção de aço via plantas integradas demanda uma maior quantidade de energia por tonelada de aço bruto produzido, devido principalmente à alta demanda térmica no processo de redução no alto-forno, nos processos de sinterização, coqueria e laminação. Nas plantas semi-integradas o consumo é reduzido ao se utilizar a sucata como matéria-prima e quando a redução é feita em fornos de arco elétrico. Em ferro-gusa o consumo intensivo de energia está no alto-forno, e se reduz todo o processo de aciaria e laminação. Para pelotização, o consumo está representado no forno de queima de pelotas e nos motores de grande consumo em equipamentos de processo para formação de pelotas como no moinho, filtro de disco, misturador e disco de pelotamento.

2.c. Indicadores que serão quantificados a partir da análise da realidade brasileira atual

Os indicadores energéticos são uma ferramenta de extrema importância para análises de interações entre as atividades econômica e humana, do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (BEU, 2005).

Os indicadores que serão quantificados neste estudo serão:

Consumo específico

Para cada equipamento, planta ou instalação caracterizada por um parâmetro de atividade único, pode-se calcular o consumo específico de energia como o quociente entre o consumo final de energia da instalação e cada unidade de cada atividade. Mede-se em (unidades de energia)/(unidades de produção), por exemplo [GJ/tonelada] ou [kWh/tonelada].

O consumo específico é característico da tecnologia de produção, só muda no caso em que as instalações perdem ou ganham eficiência por modificação nas condições de operação ou manutenção, assim como em caso de mudança das tecnologias de processo por outras de maior eficiência.

Rendimento energético

A relação entre a quantidade de energia útil e a energia fornecida é o chamado rendimento energético de uma máquina. Se uma máquina tem um alto rendimento, significa que ela possui poucas perdas de energia, enquanto se uma máquina possui um rendimento baixo, significa que ela tem grande perda de energia.

O conceito de rendimento energético que será utilizado neste estudo refere-se apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo. Isso simplifica e facilita a determinação dos rendimentos energéticos dos equipamentos em uso e traz algumas diferenças quanto ao significado das perdas energéticas que são estimadas pelo estudo (BEU, 2005).

Ao usar esse conceito, o modelo não vai estimar todas as perdas do processo produtivo. As perdas reais serão sempre maiores do que as estimadas, portanto, as possibilidades reais de economia de energia serão maiores que as estimadas através do modelo (BEU, 2005).

Outro conceito que é levantado é o de que o rendimento estimado precisa representar a média dos rendimentos de transformação de uma fonte de energia final para um determinado uso final de atividade.

Coefficiente de destinação

Os coeficientes de destinação fazem referência às porcentagens de energia que são destinadas a cada uso final de energia (BEU, 2005):

- Força motriz: Energia usada em motores estacionários ou de veículos de transporte, individual ou coletivo, de carga, tratores, etc.;
- Calor de Processo: Energia usada em caldeiras e aquecedores de água e fluidos térmicos;
- Aquecimento Direto: Energia usada em fornos, fornalhas, radiação, aquecimento por indução, condução e micro-ondas;
- Refrigeração: Energia usada em geladeiras, freezers, equipamentos de refrigeração e ar condicionado, tanto de ciclo de compressão como de absorção;
- Iluminação: Energia usada em iluminação de interiores e externa;
- Eletroquímica: Energia usada em células eletrolíticas, processos de galvanoplastia, eletroforese e eletrodeposição;
- Outros usos: Energia usada em computadores, telecomunicações, máquinas de escritório, xerografia e equipamentos eletrônicos de controle.

Os coeficientes são coletados por meio de entrevistas a empresas, pesquisas junto a fornecedores de equipamentos, programas de governo e outras bases de dados. O Coeficiente de Destinação de uma determinada forma de energia final é impactado por mudanças estruturais nos padrões de consumo da sociedade. O Coeficiente de Eficiência Energética de um determinado equipamento expressa seu rendimento na transformação da energia final em algum uso final, e é impactado por alterações tecnológicas e culturais.

3. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS PRINCIPAIS DO SEGMENTO INDUSTRIAL

As matérias-primas utilizadas na produção do aço são ferro, carvão e cal. A obtenção do ferro ocorre através do minério de ferro que é encontrado por toda superfície da Terra na forma de óxido de ferro mesclado com a areia fina (IABr, 2015).

O uso do carvão mineral e carvão vegetal, na siderurgia, depende do objetivo. No geral, o carvão tem duas funções na fabricação do aço (IABr, 2015):

- 1- Combustível, que alcança altas temperaturas necessárias para a redução do minério;
- 2- Reagente redutor, pois se associa ao oxigênio desprendido do minério, deixando o ferro livre. Este processo de redução ocorre dentro do alto-forno.

A fabricação do aço começa com a preparação do minério de ferro e do carvão para melhorar o rendimento e a economia do processo. O ferro é sinterizado ou transformado em pelotas e o carvão mineral é submetido ao processo de coqueificação para a obtenção do coque. Logo após, o minério de ferro e o carvão são alimentados no processo de redução no alto-forno, onde o ferro se liquefaz, formando o ferro-gusa e os outros componentes como: calcário, sílica, entre outros, que formam a escória (IABr, 2015).

Em seguida, o ferro-gusa líquido é transportado até a aciaria, onde será refinado em fornos a oxigênio mediante a queima de impurezas, e, logo depois, será solidificado em forma de produtos semiacabados (lingotes, tarugos, etc.).

3.a. Principais processos de produção do subsegmento Pelotização

As pelotas são produzidas a partir dos finos de minério de ferro e são fabricadas por meio do processo de pelotização. Este processo foi criado com a intenção de aproveitar os finos de minério de ferro que eram gerados durante a lavra do mesmo e que não estavam sendo aproveitados no processo por conta da dificuldade de manuseá-los e transportá-los, diminuindo a permeabilidade dos gases redutores dentro do alto-forno. Além disso, os finos eram carregados pelo topo do alto-forno durante o processo de redução, emitindo uma enorme quantidade de poeira à atmosfera (LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. A., 2010).

O processo de pelotização é composto, principalmente, por três etapas:

- Preparo da matéria-prima;
- Formação das pelotas cruas;
- Processamento térmico.

O preparo da matéria-prima é composto por vários processos, onde o primeiro deles é a concentração e a separação de impurezas, cujas principais operações são: lavagem, concentração gravimétrica, separação magnética, flotação convencional e flotação em colunas. Em seguida, o material é empilhado (uma pilha típica possui de 45.000 a 50.000 tons de minério) junto com os aditivos, com o objetivo de minimizar flutuação das propriedades das diversas matérias-primas (SILVA, D. A., 2013).

A recuperação do material é feita utilizando uma recuperadora com roda de caçambas que escava o material em uma ou mais passadas pela seção transversal da pilha, proporcionando homogeneidade. Em seguida, o minério passa por um processo de moagem através de moinhos e/ou prensa de rolos para ajustar as propriedades físicas da mistura de minérios às exigências do pelotamento e processamento térmico (SILVA, D. A., 2013).

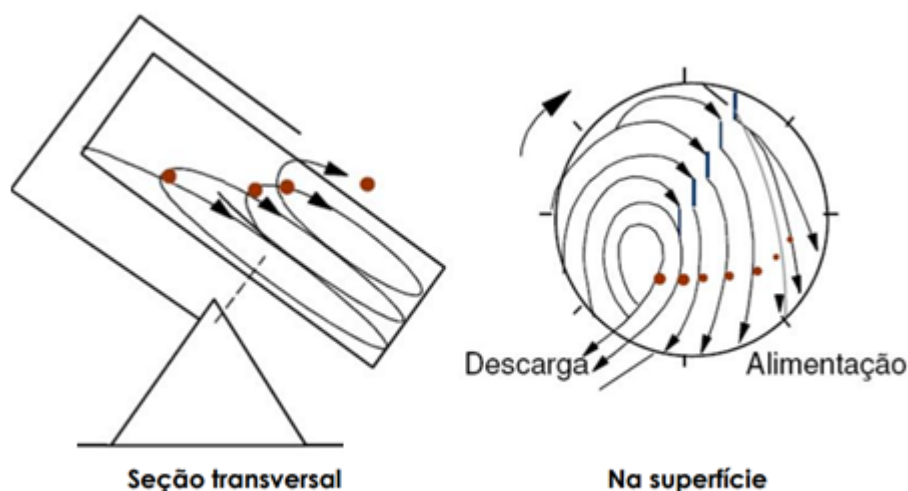
Nas plantas com circuito de moagem fechado a úmido, é necessária uma etapa de espessamento da polpa ciclizada via princípio da sedimentação (normalmente exige-se adição de floculante), a manutenção de sólidos em suspensão e polpa homogeneizada em tanques com agitação mecânica e uma posterior filtragem em filtros de discos rotativos a vácuo, de onde se obtém uma “polpa retida” com umidade entre 8% a 10% (SILVA, D. A., 2013).

A etapa de formação de pelotas cruas inicia-se com a adição dos fundentes, aglomerantes, e, eventualmente, combustível sólido, buscando cumprir as especificações da pelota queimada. O objetivo da adição de fundente à pelota é modificar a basicidade da ganga da pelota e os mais utilizados são: os calcários calcítico ou dolomítico, dunito ou magnesita. Enquanto os aglomerantes visam a formação de pelotas cruas com resistência física suficiente para resistir ao trajeto do pelotamento e os mais usados são: bentonita e cal hidratada. Em algumas plantas, os fundentes são adicionados diretamente na pilha de minério e moídos conjuntamente (MOURÃO, J. M., 2017).

Uma vez que os fundentes e aglomerantes foram adicionados procede-se à mistura, uma etapa crítica na qual é importante uma adequada eficiência de mistura para garantir a qualidade das pelotas cruas e para reduzir os desvios-padrão dos parâmetros de qualidade (SILVA, D. A., 2013).

No pelotamento são usados discos ou tambores. O sistema de tambores é o método mais antigo e tem como desvantagem a necessidade de precisar peneirar as pelotas na descarga para garantir que estejam dentro da granulometria especificada (SILVA, J. N., 2011).

Já o sistema de discos é mais simples, trata-se de discos inclinados com diâmetro em torno de 7,5 metros, que são alimentados mediante um dosador, uma balança e um desagregador. O material depositado realiza uma trajetória elíptica, sendo que as pelotas mais leves têm tendência a subir para o centro do disco e as mais pesadas vão se acumulando nas bordas, como é mostrado na Figura 2 (SILVA, J. N., 2011).



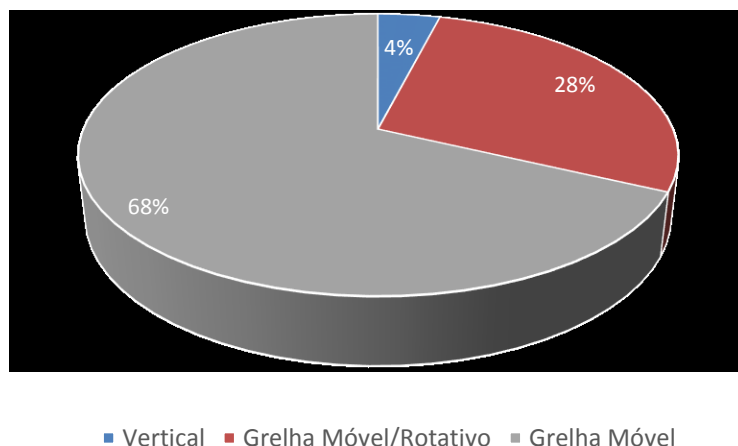
Fonte: SILVA D. A. (2013)

Figura 2: Movimento do pellet feed no disco de pelotização

A pelotização baseia-se na ação de forças capilares no sistema: partículas de minério - água - ar, com a adição de água às partículas, proporcionando a umidade que é necessária para que as pelotas sejam formadas, pois a umidade fornece a força coesiva para que as partículas que serão pelotizadas sejam aderidas. A quantidade de água adicionada varia de acordo com o material a ser pelotizado (SILVA, D. A., 2013).

A rotação amplia a adesão, pelo aumento dos pontos de contato associado com a força de compressão por causa da pressão do material circulante, e devido a essa pressão e ao movimento, os aglomerados mais fracos são partidos em partículas menores. Com isso, acontece uma seleção das pelotas mais resistentes, permitindo a produção de pelotas de densidade e resistência muito uniformes que são classificadas em peneiras de rolos (SILVA, D. A., 2013).

Por último, as pelotas cruas dirigem-se ao forno para o processamento térmico. Os principais tipos de fornos para queima de pelotas são: o forno de grelha móvel (*Travelling Grate*), o forno de grelha móvel com forno rotativo (*Grate Kiln*) e o forno vertical (*Shaft Furnace*), sendo o de grelha móvel o mais utilizado mundialmente. A tecnologia de *Traveling Grate* equivale a 2/3 da capacidade total de produção de pelotas no mundo, distribuídos conforme o Gráfico 7 (LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. A., 2010):



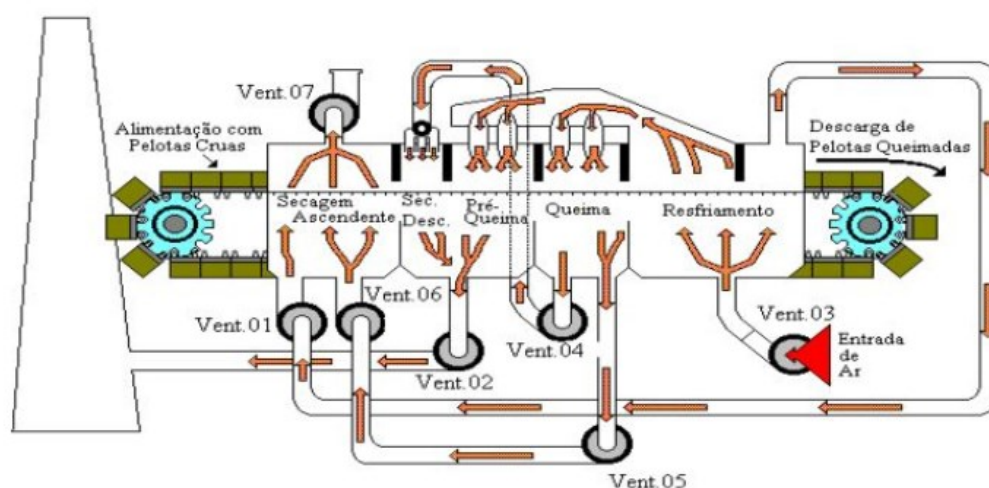
Fonte: VALER, EDUCAÇÃO VALE (s.d.)

Gráfico 7: Panorama mundial dos fornos em operação da produção de pelotas

Então, as pelotas cruas são submetidas a um aquecimento até aproximadamente 1300 °C no forno de pelotização, o que provoca uma série de reações químicas entre os ácidos do minério e as bases das adições, formando eutéticos de baixo ponto de fusão. Essas reações dependem das condições de queima e dos parâmetros físicos das pelotas cruas como o tipo de minério de ferro, os aditivos e os aglomerantes utilizados na formação das mesmas (SILVA, D. A., 2013).

Esses compostos, nomeados de fases mineralógicas, são responsáveis por endurecer e garantir a resistência final das pelotas (SILVA, D. A., 2013).

Durante a queima das pelotas ocorrem os seguintes estágios: secagem e aquecimento, aquecimento e pré-queima, pré-queima e queima e endurecimento pela secagem, conforme pode ser visto na Figura 3 (SILVA, D. A., 2013).

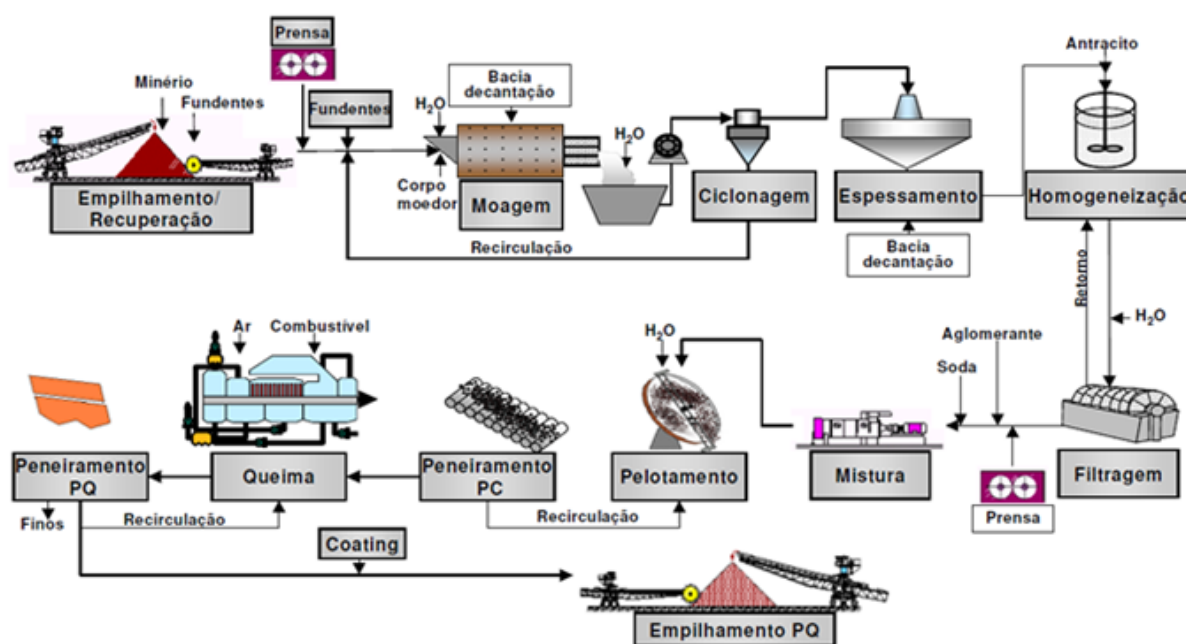


Fonte: DINIZ, E. J. (2014)

Figura 3: Desenho esquemático do forno de pelotização de grelha móvel

Após as pelotas serem queimadas, elas passam por um peneiramento que visa o ajuste final na especificação granulométrica, eliminando os materiais com granulometria inferior a 6,3 mm. Também é separada nessa peneira uma parcela do produto que será recirculado para formação da camada de forramento da grelha do forno. O produto final, após o peneiramento será encaminhado para o pátio de estocagem de pelotas (SILVA, D. A., 2013).

O processo anteriormente descrito é apresentado no fluxograma do processo de produção de pelotas na Figura 4.



Fonte: VALE (2014)

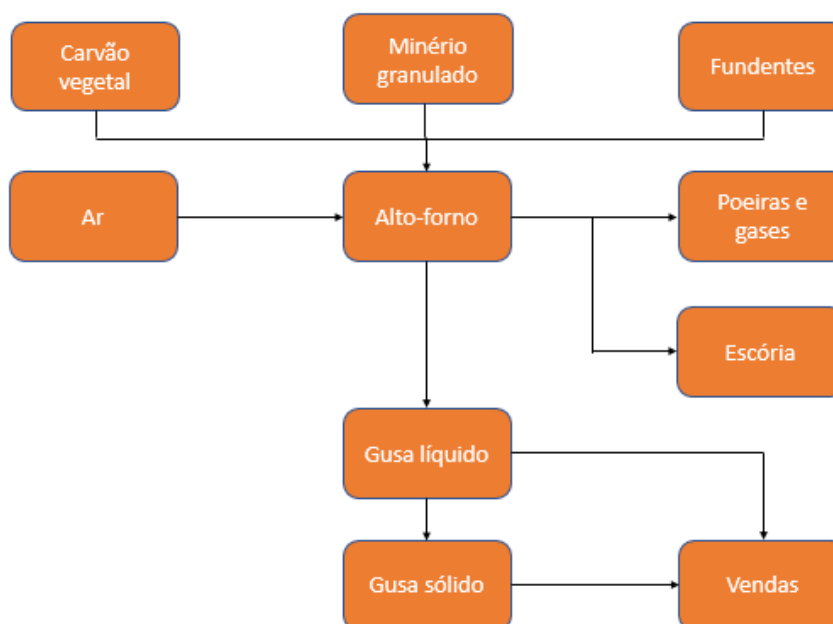
Figura 4: Fluxograma do processo de produção de pelotas

3.b. Principais processos de produção do subsegmento Produção de Gusa

O ferro-gusa é o produto resultante da redução do minério de ferro granulado, sínter ou pelotas, pelo coque metalúrgico ou carvão vegetal e calcário em um alto-forno. O coque metalúrgico é basicamente o resultado da coqueificação do carvão mineral, onde tanto o carvão vegetal quanto o coque atuam como combustíveis e redutores da reação (DIAS, C. A. C. M., 2011). O calcário é um aditivo que atua como fundentes, têm como objetivo aglutinar as impurezas decorrentes no processo de fusão dos materiais, formando a escória. Os fundentes mais comumente utilizados são: calcário, que é uma combinação de cálcio com carbono e oxigênio, dolomita e quartzo (SILVA, J. N., 2011). Dessa forma, esses combustíveis, junto com os fundentes e o minério de ferro no alto-forno, produzem o ferro-gusa.

A composição do ferro-gusa é dada principalmente por ferro (90 a 95%), porém possui também elevados teores de carbono (da ordem de 3,0 a 4,5 %) e elevados teores de impurezas como manganês (cerca de 0,5 a 2%), sílica (de 0,3 a 2%), enxofre (cerca de 0,01 a 1%) e fósforo (cerca de 0,05 a 2%) (DIAS, C. A. C. M., 2011).

Na Figura 5 é apresentado o esquema de produção de ferro-gusa. Como pode ser observado, as matérias-primas, aditivos e combustíveis são alimentados no alto-forno e neste é produzido o produto de interesse (gusa) e subprodutos (gases e escória). Portanto, a etapa fundamental desse processo é a conversão no alto-forno.



Fonte: MACHADO, M. L. (2003)

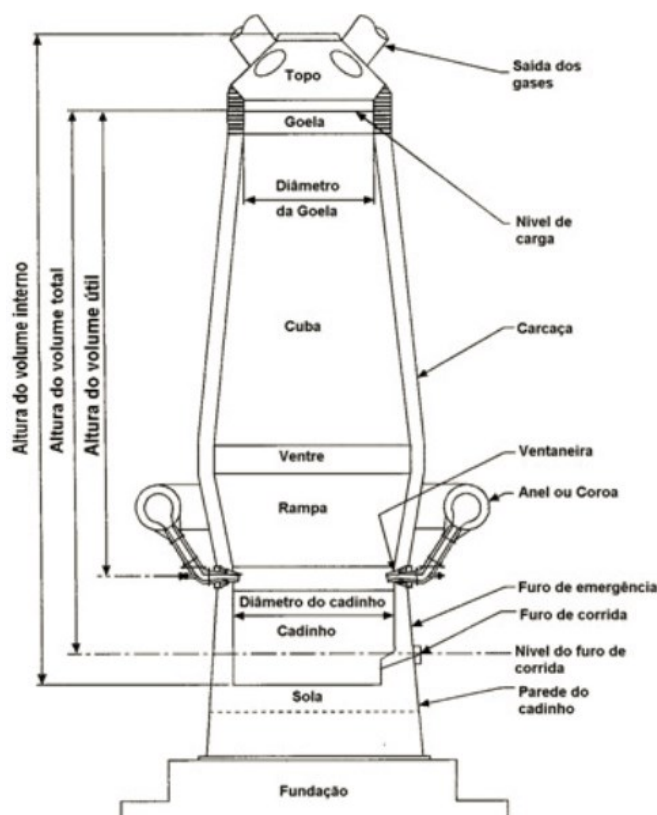
Figura 5: Esquema de produção de ferro-gusa com carvão vegetal

O alto-forno permanece sendo o mais usado para se produzir ferro-gusa em todo o mundo, mesmo que existam outros métodos.

O alto-forno é um reator vertical, tipo chaminé com formato de cuba, que opera em regime de contracorrente. A carga sólida é alimentada pelo topo do alto-forno e desce por

gravidade até a região do cadinho, reagindo com os gases que ascendem desde as ventaneiras até a goela do forno. Na parte inferior do alto-forno, o ar quente, proveniente dos regeneradores: *cowpers* ou *glendons*, é injetado aproximadamente a 1200 °C através das ventaneiras. Em frente a estas, o oxigênio presente no ar, reage com o coque ou carvão vegetal formando o monóxido de carbono (CO), que ascende no forno, reagindo com o oxigênio presente no óxido de ferro (Fe_2O_3) da carga que desce em contracorrente (VIEIRA, D. H., 2012).

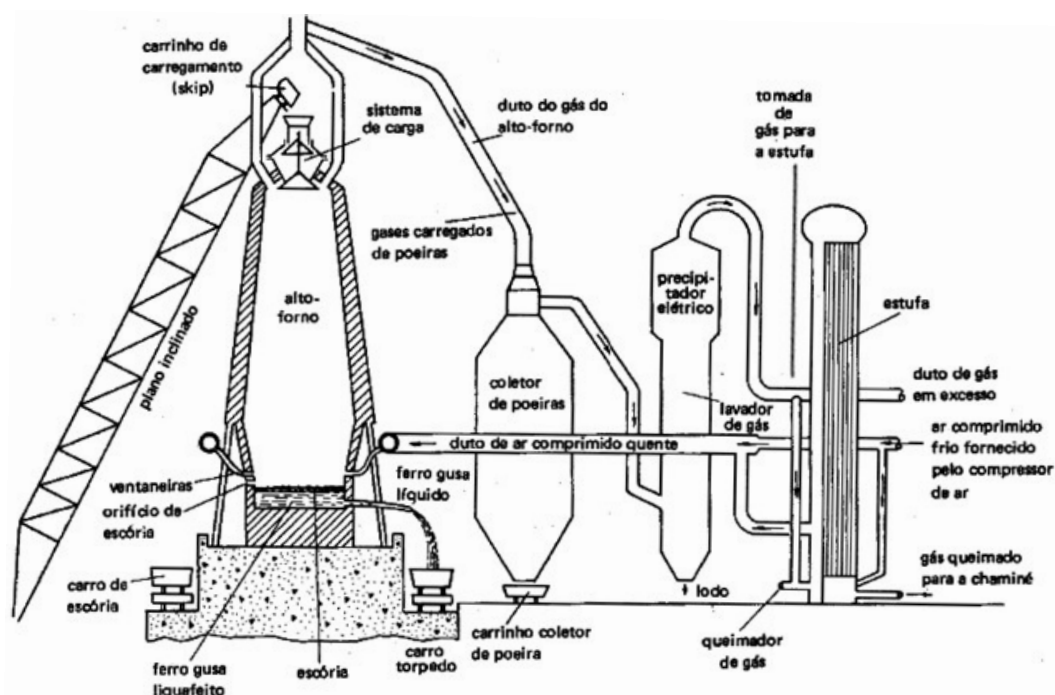
O corpo do alto-forno é dividido em topo, goela, cuba, rampa e cadinho. Existem outras partes no alto-forno que são de grande função na produção do ferro-gusa, como as ventaneiras, o anel de vento e o furo de corrida do ferro-gusa. Estes elementos são mostrados no desenho esquemático do alto-forno na Figura 6 (SILVA, J. N., 2011).



Fonte: MACHADO, M. L. (2003)

Figura 6: Desenho esquemático do alto-forno

Para o correto funcionamento, o alto-forno conta também com uma série de equipamentos auxiliares como o sistema de limpeza dos gases e os regeneradores (*cowpers* ou *glendons*). A Figura 7 mostra o desenho esquemático dos equipamentos auxiliares do alto-forno (SILVA, J. N., 2011).



Fonte: MACHADO, M. L. (2003)

Figura 7: Equipamentos auxiliares do alto-forno

A camada mais densa que é formada no alto-forno é o ferro-gusa, e a menos densa é a escória. As duas camadas saem do alto-forno juntas por um único orifício, chamado furo de gusa, e a separação é feita pela diferença de densidade no canal de corrida principal. A escória, formada quando os calcários se decompõem em CaO , CO_2 e impurezas como silicatos e aluminatos, segue para o sistema de granulação, onde recebe jatos de água pressurizados para ficar com granulometria fina devido ao choque térmico (SILVA, J. N., 2011).

O ferro-gusa, que sai do alto-forno, possui ainda altos teores de enxofre e precisará ser dessulfurado. Esta dessulfuração é feita nos carros torpedos com uma mistura dessulfurante que é composta, em média por 50% de carbureto de cálcio, 38% de calcário e 12% de coque (MACHADO, M. L., 2003). Os carros torpedos seguem para aciaria para transformar o ferro-gusa em aço, mas o ferro-gusa líquido pode ser solidificado nas lingoteiras (Figura 8) e este será o produto final.



Fonte: SINOBRAS (s.d.)

Figura 8: Lingotamento do ferro-gusa

Além destes dois produtos, são gerados os gases do alto-forno, que na maioria dos casos, são utilizados para aquecimento do ar nos *glendons* ou *cowpers* e para produzir energia elétrica nas termoelétricas, depois de serem limpos num sistema de controle que separa as partículas sólidas, formando uma lama (SILVA, J. N., 2011).

Como o processo de produção de ferro-gusa é constituído basicamente pela etapa do alto-forno, é importante mencionar os principais combustíveis utilizados nesse processo: o coque metalúrgico e o carvão vegetal.

O coque metalúrgico é o principal combustível utilizado na fabricação de ferro-gusa. Geralmente é fabricado a partir da mistura de vários tipos de carvões minerais nas coquearias, que são conjuntos de fornos dispostos lado a lado onde o carvão é depositado e permanece por aproximadamente 16 horas a 1300 °C sem contato com o ar, resultando em um produto com um alto poder calorífico e um alto teor de carbono para garantir um bom rendimento no alto-forno (SILVA, J. N., 2011).

O carvão vegetal é considerado um combustível de alta qualidade pelas suas propriedades e seu alto grau de pureza, porém tem algumas desvantagens tais como a baixa resistência mecânica, muito importante no alto-forno, uma vez que o combustível fica embaixo da coluna de carga e tem que suportar todo o seu peso. Na indústria siderúrgica brasileira, esse tipo de combustível participa, ainda com cerca de 20% da produção total de ferro-gusa (SINDIFER, 2016).

Ambos, possuem mais duas funções além da função de combustível: produzir gás redutor ou agir diretamente na redução, garantindo a permeabilidade da coluna de carga, fazendo com que o calor circule mais facilmente através da carga (SILVA, J. N., 2011).

O coque continua sólido em condições de elevadas temperaturas no alto-forno e mantém níveis de resistência para as distintas solicitações que sofre dentro do forno, mantendo a distribuição de tamanhos adequados a uma boa permeabilidade (FERNANDES, M. V., 2007).

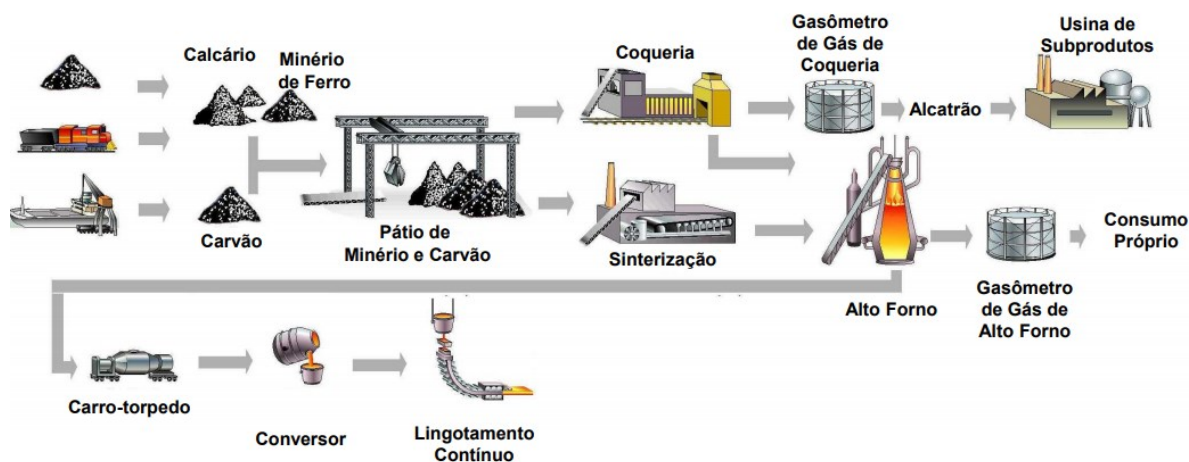
3.c. Principais processos de produção do subsegmento Produção de Aço via plantas integradas a carvão mineral e a carvão vegetal

O aço é formado por uma liga de ferro e carbono, onde o ferro é obtido de minérios encontrados na natureza, normalmente na forma de óxidos de ferro, e o carbono é obtido do carvão mineral ou vegetal.

O processo de produção de aço, nas usinas siderúrgicas, segue basicamente duas rotas tecnológicas (EPE, 2009):

- **Usinas Integradas:** utilizam altos-fornos, para a redução do minério de ferro, alimentados com o coque obtido a partir do carvão mineral nas coquearias ou com carvão vegetal, produzindo ferro-gusa. O ferro-gusa é transportado até a aciaria, onde é refinado, transformando-se em aço líquido em um forno a oxigênio. Após esta etapa, o aço líquido é lingotado e laminado.
- **Usinas Semi-integradas:** utilizam como principal matéria-prima a sucata, razão pela qual o processo se inicia diretamente com o refino em fornos elétricos, seguido pelo lingotamento e laminação.

A Figura 9 mostra esquematicamente as principais etapas do processo produtivo de uma unidade integrada a coque (alto-forno e lingotamento direto):



Fonte: SCHEID, A. (s.d.)

Figura 9: Rota de produção em unidades integradas a coque (alto-forno e lingotamento direto)

Como descrito anteriormente, esse processo é iniciado com a formação de ferro-gusa, portanto, o processo obedece a descrição feita na seção 3.b. desse relatório.

Processo de redução no alto-forno

De modo geral, é utilizado como matéria-prima o minério de ferro (sínter ou pelotas), aditivos fundentes e materiais de geração interna. Os materiais de geração interna são geralmente resíduos siderúrgicos produzidos na usina, que podem impactar o meio

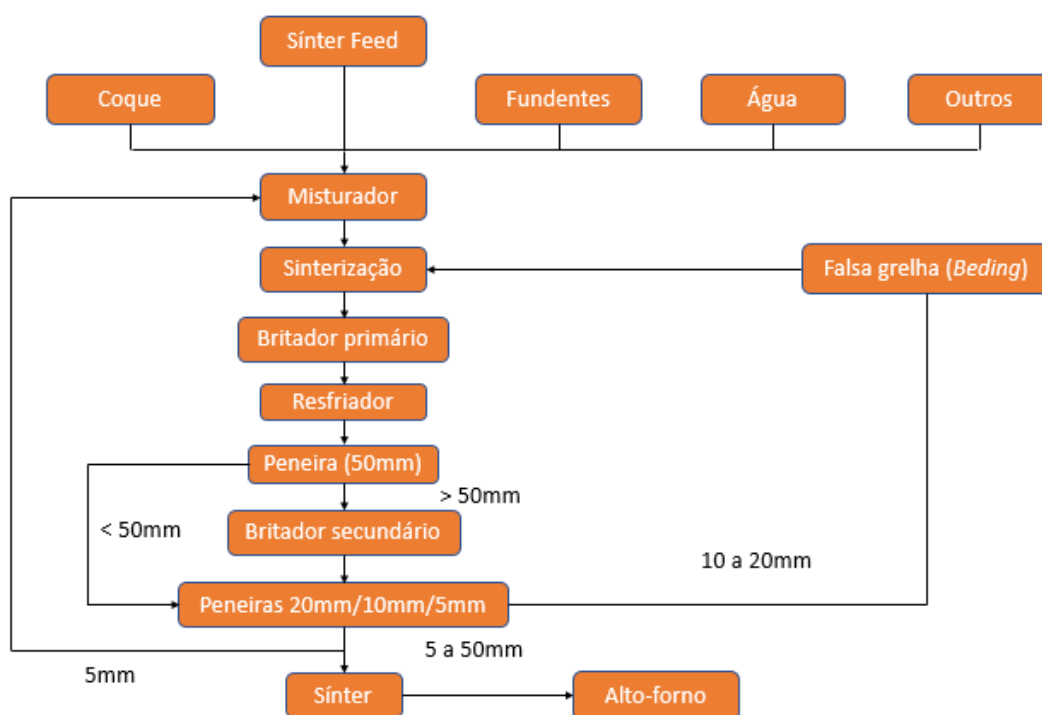
ambiente, sendo de extrema importância o seu reaproveitamento. Dentre eles, estão o pó de minério, o pó de coque, o pó de carvão e a escória de alto-forno (MACHADO, M. L., 2003). Além destes, também é utilizado coque metalúrgico ou carvão vegetal virgem, como matéria-prima e combustível do processo.

O coque, como comentado anteriormente, é um resíduo sólido obtido através da destilação de determinados carvões minerais após um processo de coqueificação, onde o mineral é submetido a altas temperaturas na ausência de oxigênio. O coque geralmente é fabricado usando misturas complexas que podem incluir mais de dez tipos diferentes de carvões minerais (SILVA, J. N., 2011).

Como visto na Figura 9, paralelamente a coqueria tem-se a etapa de sinterização, para formação do sínter, que é um aglomerado de partículas finas de minério de ferro obtido por fusão incipiente de uma mistura de minerais de ferro, aditivos fundentes e coque. Esta mistura tem por finalidade melhorar a permeabilidade metálica da carga. O sínter ideal deve ter mais de 60% de ferro, o mínimo de enxofre e fósforo e possuir propriedades mecânicas que assegurem sua integridade granulométrica baixo às pressões e temperaturas do forno (SILVA, J. N., 2011).

Antes de ser introduzida na máquina de sinterização, a mistura mineral é submetida a uma granulação, que consiste em homogeneizar a mistura num tambor giratório, com a finalidade de dar-lhes a permeabilidade adequada à subsequente operação de queima. Em seguida, é colocada sobre a grelha na faixa de sinterização uma camada de sínter já produzida numa espessura uniforme de 25 a 40 mm (falsa grelha). A mistura, homogeneizada anteriormente, é colocada sobre essa falsa grelha, onde a temperatura atinge de 1000 °C a 1300 °C, pouco abaixo do ponto de fusão dos minerais (SILVA, J. N., 2011). Após a queima, é obtido um material poroso, que será quebrado, resfriado, e peneirado, por último o sínter com granulometria especificada é alimentado no alto-forno para redução e assim, produção do ferro-gusa, como mostra o diagrama de blocos da Figura 10.

Outra maneira de obtenção de ferro-gusa em plantas integradas é através da utilização de pelotas, ao invés de sínter, neste caso a etapa de sinterização é desconsiderada. As pelotas são aglomerados esféricos de finos de minério de ferro, obtidas através do processo de pelletização, que consiste no rolamento das partículas finamente moídas e umedecidas e depois submetidas à redução no alto-forno, a uma temperatura entre 1250 °C e 1320 °C (SILVA, J. N., 2011). O processo completo foi descrito no item 3.a.



Fonte: MACHADO, M. L. P. (2006)

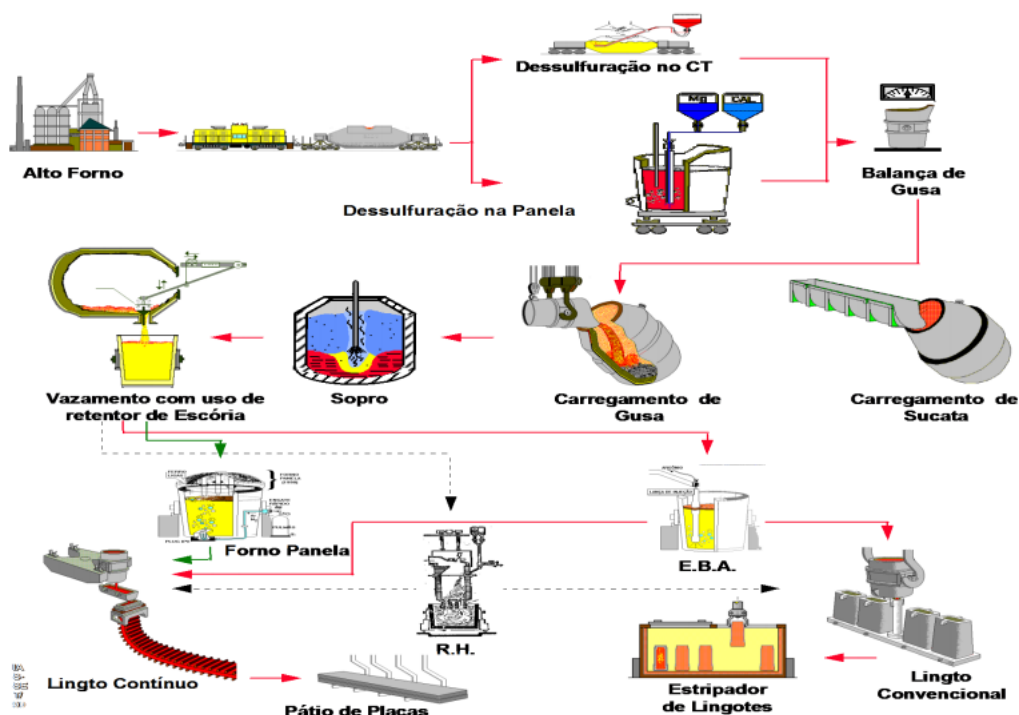
Figura 10: Diagrama de blocos do processo de sinterização

Produção do Aço pelo processo de lingotamento direto (LD)

Após a produção do ferro-gusa no alto-forno, este produto intermediário é encaminhado para a etapa de refino do aço, por meio dos carros torpedos ou fornos painelas, onde é dessulfurado, através da injeção de calcário e gás inerte mediante uma lança submergida (SILVA, J. N., 2011).

O ciclo de operações de refino no forno LD pode ser observado na Figura 11. Este envolve as seguintes seis etapas:

- Carregamento de sucata;
- Carregamento do ferro-gusa líquido;
- Sopro;
- Medição de temperatura e retirada de amostras;
- Vazamento;
- Vazamento de escória.

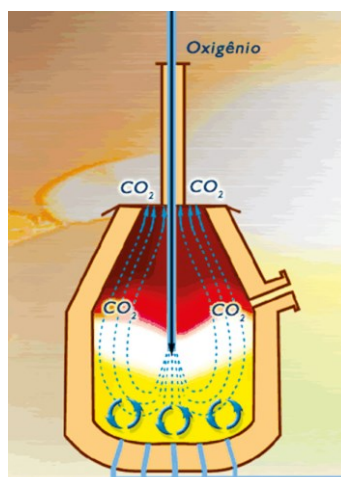


Fonte: MACHADO, M. L. (2003)

Figura 11: Fluxograma do processo de Aciaria LD

No processo LD são utilizados principalmente o ferro-gusa líquido, ferro-gusa sólido, sucatas de aço e ferro fundido, cal, fluorita e oxigênio. Sendo que, segundo SILVA, J. N. (2011), 70 a 75% da carga metálica é de ferro-gusa líquido, e o restante é constituído da mistura de vários tipos de sucata.

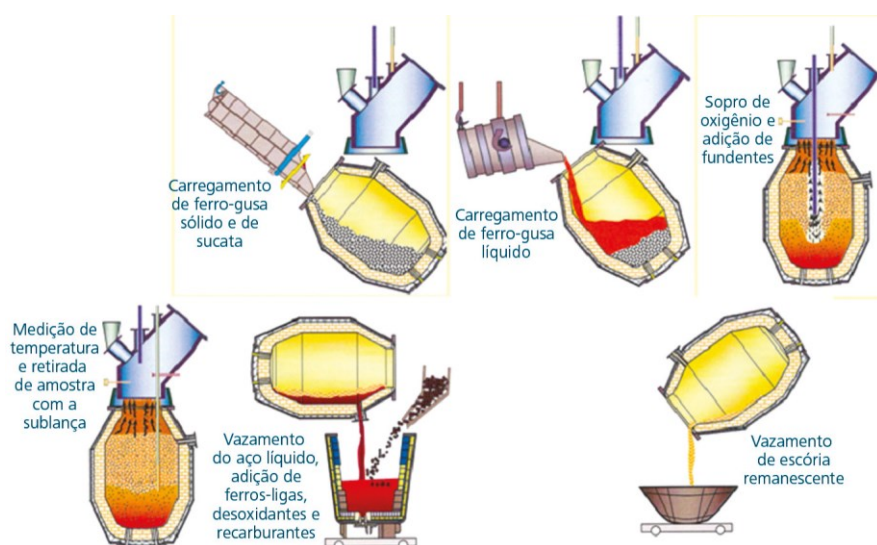
No forno utilizado no processo LD, consegue-se a oxidação do metal líquido, minimizando os níveis de impurezas, mediante a introdução de oxigênio através de uma lança, pela abertura superior do forno, combinado com a injeção de gás natural pelo fundo, como é mostrado na Figura 12. (SILVA, J. N., 2011).



Fonte: RIZZO, E. M. (2006)

Figura 12: Desenho esquemático do Conversor LD

O conversor LD é suspenso por uma sustentação em forma de anel e sobre ele está o sistema que capta fumaças, podendo ser do tipo com caldeira e queima de gases na chaminé ou do tipo OG (*off gás*) com recuperação de gás. A operação do conversor LD é feita com o giro do conversor na direção do lado de carregamento, assim como é mostrado na Figura 13 (MACHADO, M. L., 2003).



Fonte: RIZZO, E. M. (2006)

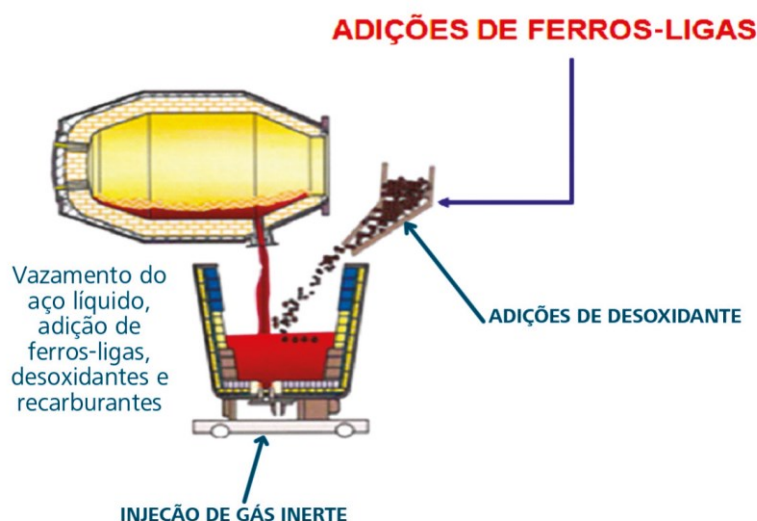
Figura 13: Sequência de operação do conversor LD

Após o carregamento, o material é submetido a etapa de sopro, onde é introduzido oxigênio de elevada pureza (99,5%) e fundentes. O tempo de sopro varia de 17 a 18 minutos, e o tempo total da corrida varia aproximadamente de 36 a 40 min (SILVA, J. N., 2011). Outro material importante nessa etapa é a cal (fundente), para a escorificação da sílica, que se forma com a oxidação do silício da carga de metal e para remover o fósforo e o enxofre.

Deve-se, também, manter na escória uma quantidade de cal para reduzir o ataque dos refratários (MACHADO, M. L., 2003).

Quando o sopro é interrompido, o conversor é balanceado até ficar numa posição horizontal, para medição da temperatura e retirada de amostras de aço e escória. Se a composição química e a temperatura corresponderem aos valores esperados, o conversor é girado no sentido contrário para vazamento da carga na panela de aço (MOURÃO, M. B., 2013). Nesse último vazamento, é realizada a desoxidação do aço por meio de alumínio e/ou sílica, que são lançados no jato de aço, por meio de calhas direcionais, junto com as ferro-ligas, que darão umas características determinadas ao aço (SILVA, J. N., 2011).

É importante ressaltar que para controlar a temperatura do metal no final do sopro é necessário o uso de material refrigerante, porém é mais rentável utilizar uma maior quantidade de sucata de aço, já que o seu teor em ferro é maior do que o de ferro-gusa (SILVA, J. N., 2011).



Fonte: RIZZO, E. M. (2006)

Figura 14: Desenho esquemático da adição de ferros-ligas

Após o vazamento, o conversor retorna para sua posição no início do carregamento e a escória é vazada no pote, recomeçando o ciclo. A panela de aço, depois de ter sua temperatura medida, será levada para as máquinas de lingotamento contínuo ou para o lingotamento convencional para produção de produtos semiacabados (MACHADO, M. L., 2003).

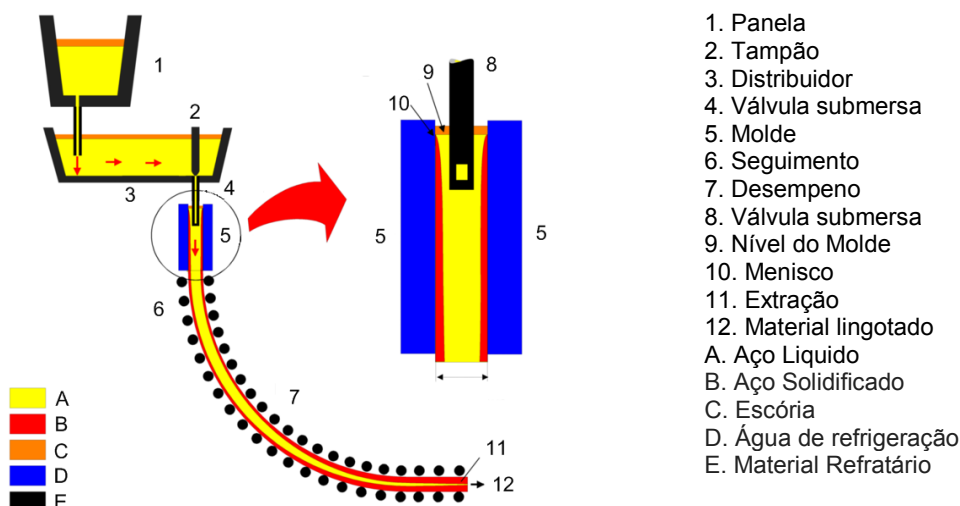
Lingotamento contínuo

O lingotamento contínuo é um processo que produz placas ou tarugos de aço diretamente do aço líquido em um único equipamento. Segundo MOURÃO, M. B. (2013), o processo de lingotamento contínuo compreende a seguinte sequência de operações:

- Fluxo do metal líquido através de um distribuidor para alimentar o molde;
- Formação de uma casca solidificada, no molde em cobre, resfriado a água;

- Extração contínua da peça;
- Remoção de calor do núcleo ainda líquido, por meio de sprays de água de resfriamento;
- Corte no comprimento desejado e remoção das peças.

No geral, uma instalação de lingotamento contínuo é constituída dos equipamentos mostrados na Figura 15.



Fonte: Elaboração própria com base em dados de KROBATH, M. (2008)

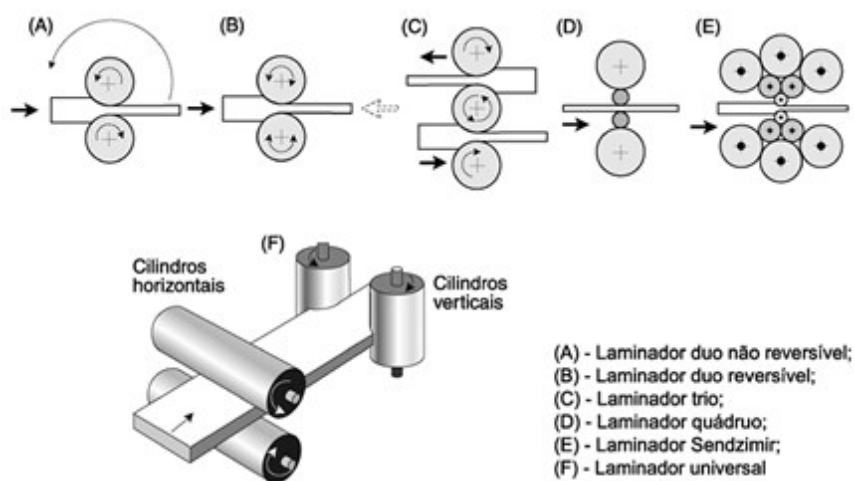
Figura 15: Máquina de lingotamento contínuo

Laminação

A laminação é um processo mecânico através do qual se reduz a espessura de uma lâmina de metal. O metal passa entre dois cilindros de aço ou ferro fundido com eixos paralelos, e é comprimido mediante às forças de compressão exercidas pelos cilindros. A Figura 16 mostra os diferentes tipos de laminadores (ABAL, s.d.).

Antes do material ser laminado, precisa ser reaquecido nos fornos de reaquecimento, até obter a plasticidade adequada para permitir a redução mecânica à seção desejada.

A laminação pode ser a quente ou a frio. Normalmente, a laminação a quente é utilizada nas operações de desbaste e a laminação a frio nas operações de acabamento. Depois desta última etapa, as operações de acabamento envolvem outros tratamentos térmicos ou tratamentos superficiais (ABAL, s.d.).



Fonte: (ABAL, s.d.)

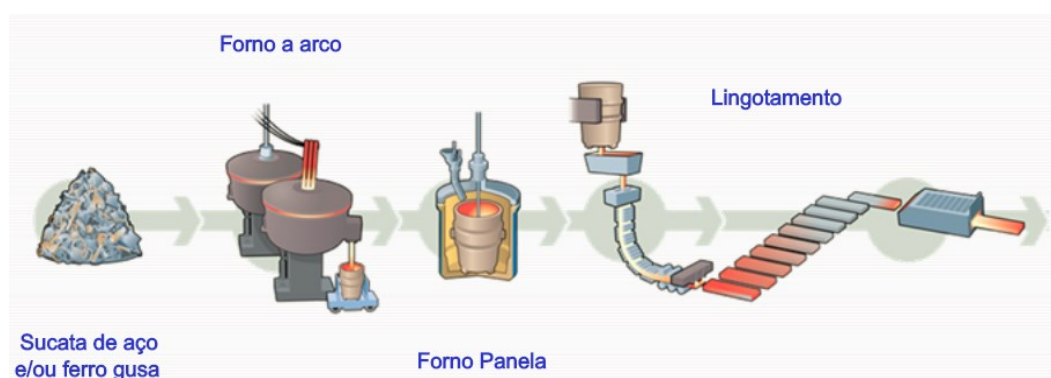
Figura 16: Tipos de laminadores

3.d. Principais processos de produção do subsegmento Produção de Aço via plantas que essencialmente reaproveitam sucata metálica

Nas usinas semi-integradas desenvolvem-se apenas os processos de refino e laminação, e a matéria-prima básica utilizada é a sucata ferrosa (MOURÃO, M. B., 2013). Um dos elementos que constitui a sucata ferrosa é o carbono. Em consequência, não é necessária a utilização do carvão mineral no processo (CARÁ, J. A., 2013).

Nessas usinas, a eletricidade é a fonte de energia predominante, já que a depuração química da carga metálica é feita em fornos elétricos (PEREIRA, R. R., 2009).

A Figura 17 mostra, esquematicamente, as principais fases do processo produtivo em uma unidade semi-integrada por meio de forno elétrico a arco.

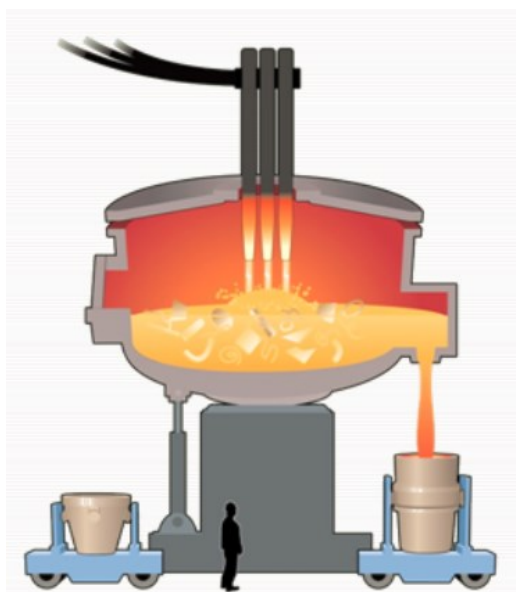


Fonte: PAVANATI, H. C. (s.d.)

Figura 17: Rota de produção a partir de aciaria elétrica (EAF)

Segundo SILVA, J. N. (2011), os principais tipos de fornos utilizados nas usinas semi-integradas são:

- **Forno a arco indireto:** o arco voltaico é formado entre os eletrodos, que não mergulham na carga, e o calor é irradiado para o material. Este tipo de forno é relativamente estável e constante, mas tem como desvantagem o fato de que o consumo de energia é maior do que nos fornos a arco direto, sendo menos utilizado.
- **Forno a arco direto:** o arco é gerado pela passagem da corrente elétrica entre os eletrodos através da própria carga, que deve ser um condutor. Desta forma, a transferência de calor ocorre diretamente para a carga como é mostrado na Figura 18.
- **Forno a indução:** é passada uma corrente elétrica alternada por uma bobina primária (refrigerada) e o metal atua como bobina secundária. Desta forma são induzidos campos eletromagnéticos no metal, o que produz um efeito de aquecimento.
- **Forno de resistência:** o aquecimento é gerado pela passagem de uma corrente elétrica através de uma resistência, ocorrendo a transformação em energia térmica. Este forno é usado em tratamentos térmicos, sinterização de pós e fusão de materiais não ferrosos.



Fonte: PAVANATI, H. C. (s.d.)

Figura 18: Forno elétrico a arco direto

O forno comumente utilizado é o forno elétrico a arco, cujas fases são as seguintes:

- Preparo da carga e carregamento;
- Fusão da carga;
- Refino oxidante;
- Refino redutor;
- Vazamento.

A sucata é armazenada separada de acordo com sua composição, em diferentes lotes (SILVA, J. N., 2011). Estes lotes são triturados, os equipamentos trituradores de sucata ou "Shredders" separam a fração metálica ferrosa da fração metálica não ferrosa e dos materiais não metálicos (MOURÃO, M. B., 2013).

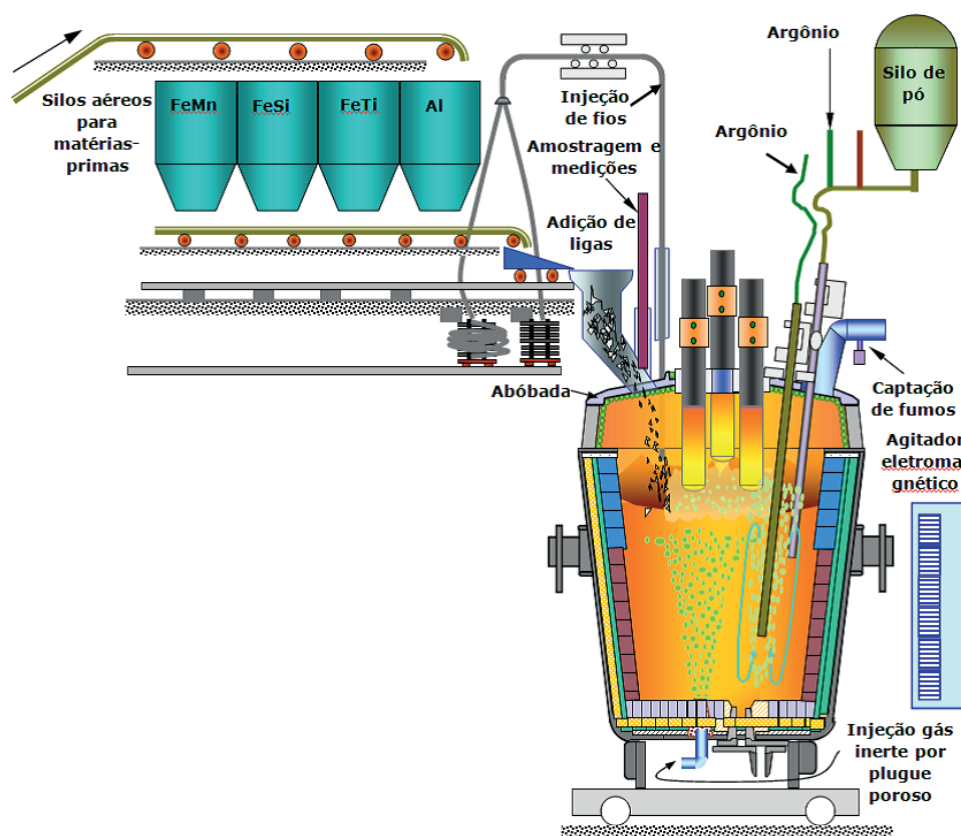
A sucata triturada é carregada em cestos que são abertos no fundo, permitindo a descida da carga no forno elétrico. Na parte mais baixa do cestão, deverá ficar a sucata leve, protegendo a soleira. Seguido das peças maiores e, logo após, vem a sucata leve, novamente para facilitação da abertura do arco voltaico (SILVA, J. N., 2011).

Uma vez feito o carregamento, o forno é fechado e os eletrodos introduzidos até tocarem na carga, ligando-se o arco, com a aplicação de voltagem e corrente máxima para fusão do material em um tempo pequeno. Dá-se a fusão como completa quando o banho está horizontal, sendo assim, o teor de carbono do material é determinado (SILVA, J. N., 2011).

O refino oxidante é realizado com a adição de minério de ferro ou carepa de laminação ao banho, e/ou com sopro de oxigênio. Os elementos químicos de interesse são oxidados, e são eliminados parcialmente em forma de óxidos que passam à escória (SILVA, J. N., 2011).

A desoxidação é realizada no forno panela através da adição de desoxidantes como o alumínio ou ferro-manganês. Por outra parte, também são adicionados gases inertes para rinsagem (nitrogênio ou argônio), conseguindo, assim, a homogeneização do aço. Finalmente, uma vez confirmada a temperatura, o aço está pronto para seu lingotamento (SILVA, J. N., 2011).

A Figura 19 mostra a representação esquemática dos principais componentes de um forno panela.



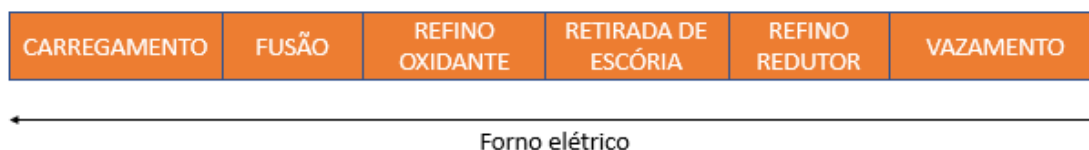
Fonte: MARANHÃO, E. A. (2017)

Figura 19: Desenho esquemático de um forno panela

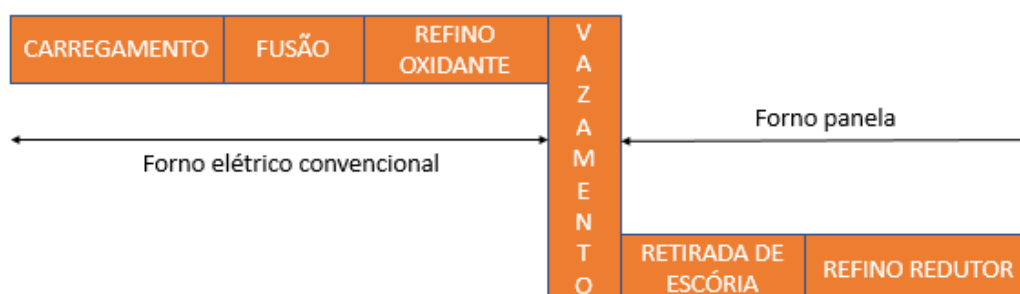
O forno panela substitui a etapa do refino redutor, separando o forno elétrico somente para a fusão e o refino oxidante, o que permite ter grandes vantagens com relação à qualidade do produto, produção e custo (SILVA, J. N., 2011).

Na Figura 20, pode ser observado a comparação entre as etapas do processo de produção de aço em um forno elétrico convencional e um forno panela.

FLUXOGRAMA DO FORNO ELÉTRICO CONVENCIONAL



FLUXOGRAMA DO FORNO PAINELA



Fonte: SILVA, J. N. (2011)

Figura 20: Comparação dos fluxogramas da fabricação de aço através do forno elétrico convencional e o forno painela

Normalmente, 100 toneladas de sucata resultam em 90 toneladas de aço, pois existem perdas pelo metal levado à escória sob a forma de óxidos, pelo ferro volatilizado no arco e coletado no sistema de despoeiramento e pelo aço perdido no vazamento ou lingotamento (SILVA, J. N., 2011).

Lingotamento contínuo

Após o refino do aço, a maioria das usinas semi-integradas utilizam o lingotamento contínuo para produzir produtos semiacabados, como as placas e tarugos. O processo do lingotamento contínuo ocorre exatamente como descrito na seção 3.c. deste relatório.

Os produtos semiacabados, como placas e tarugos, devem ser aquecidos a uma determinada temperatura em um forno de reaquecimento, dependendo do tipo e composição química do aço, para poderem ser laminados.

Laminação

Após o lingotamento do aço, pelo processo convencional ou contínuo e aquecido até a temperatura adequada. A laminação do aço pode ocorrer à quente ou à frio, para atingir as dimensões e características do produto final. Assim, como o lingotamento contínuo, o processo de laminação ocorre exatamente como descrito na seção 3.c. deste relatório.

4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO

4.a. Seleção da amostra da pesquisa

Para proceder à seleção de amostra para a pesquisa, foram considerados os quatro subsegmentos, cujos processos de produção principais já foram descritos anteriormente no relatório:

- Produção de Pelotas;
- Produção de Ferro-gusa;
- Produção de Aço via plantas integradas a carvão mineral e a carvão vegetal;
- Produção de Aço via plantas que essencialmente reaproveitam sucata metálica.

Foi estabelecido um universo total de 57 empresas que estão produzindo atualmente, tomando como base a informação disponível na Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM) e no Instituto Aço Brasil (IABr). Das 57 empresas, 6 são plantas de produção de pelotas, 17 são plantas de produção de gusa, 15 se dedicam à produção de aço via plantas integradas e 19 plantas trabalham na produção de aço com reaproveitamento de sucata.

De cada um dos subsegmentos considerados, foram considerados dois parâmetros quantitativos: o número de empresas e o consumo total de energia, esse último calculado através da relação entre a produção e o consumo específico de cada subsetor. Os dados de produção foram coletados, na maioria dos casos, dos próprios sites de cada uma das empresas siderúrgicas e os dados de consumos específicos que foram tomados da EPE (2009).

Com esses dados, pode-se obter as porcentagens relativas ao número total de empresas e à quantidade de energia consumida total correspondentes aos quatro subsegmentos. A relação entre o número de empresas e o consumo de energia diferem em maior ou menor medida nos diferentes subgrupos, destacando, por exemplo, o subsegmento de produção de aço com reaproveitamento de sucata, que ocupa 33% do total das empresas do setor, mas só consome 5% da energia total. Para equilibrar essa variância, pode-se tomar como tamanho amostral mais próximo ao ideal uma média entre os tamanhos amostrais propostos a partir das duas diferentes porcentagens. Obtém-se, assim, a quantidade total de 15 empresas a serem visitadas.

Com o número da amostra estabelecido, foi feita uma estratificação segundo a idade da empresa, parâmetro quantitativo que está diretamente relacionado com o tipo de tecnologia da planta, supondo que fábricas dentro da mesma faixa etária terão tecnologia semelhante, na maioria dos casos.

Das 15 empresas resultantes, só foi possível visitar 4 delas, referentes aos subsegmentos de ferro-gusa e pelotização. Algumas empresas se recusaram a autorizar o acesso às usinas. Porém, essas empresas entenderam a importância deste trabalho para o setor e colaboraram na análise de eficiência energética por meio do Instituto Aço Brasil (IABr), entregando os dados consolidados por rota tecnológica. Portanto, os setores que não foram

visitados tiveram todas as análises realizadas a partir dos dados agregados fornecidos pelo IABr junto com dados advindos de pesquisa bibliográfica.

4.b. Seleção das etapas do processo de produção

Para fins de pesquisa de consumo energético serão consideradas as seguintes etapas de processo por subsegmento:

- Subsegmento Produção de Pelotas: Concentração, Filtragem, *Roller Press*, Pelotamento, Forno de endurecimento, Estocagem;
- Subsegmento Produção de Ferro-gusa: Preparo do minério de ferro, preparo do carvão vegetal, Alto-forno, Lingotamento, Sistemas de energia e outros;
- Subsegmento Produção de Aço via plantas integradas a carvão mineral e a carvão vegetal: Coqueria, Sinterização, Alto-forno, Aciaria, Laminação, *Flare*, e Sistemas de energia e outros;
- Subsegmento Produção de Aço via plantas que essencialmente reaproveitam sucata metálica: Aciaria, Laminação e Outros.

4.c. Tratamento de dados

Os dados referentes aos consumos energéticos utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelas empresas visitadas para o caso de pelotização e ferro-gusa e pelo Instituto Aço Brasil (IABr) e por dados da literatura no caso de Plantas Integradas e Semi-integradas.

Os dados utilizados são do ano de 2015, tais quais: energia elétrica, produção, carvão, óleo combustível e gás natural. Algumas informações foram estimadas pelas empresas pois elas não a tinham ou não faziam seu acompanhamento conforme o desenvolvido nesse estudo.

Para a obtenção dos valores médios de cada subsegmento realizou-se uma média ponderada em função da produção dos valores das empresas de cada subsegmento.

5. INDICADORES DE CONSUMO ENERGÉTICO POR SUBSEGMENTO

5.a. Subsegmento Pelotização

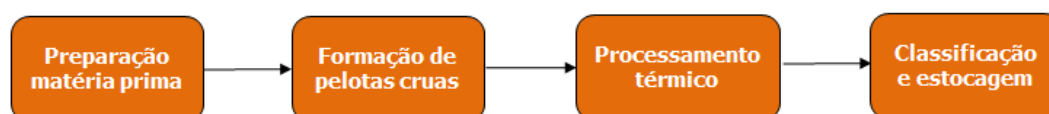
5.a.i. Situação atual

5.a.i.1) Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

As empresas deste subsegmento são produtoras de pelotas de ferro a partir de finos de minério de ferro, calcário e carvão ou coque.

Este subsegmento possui minas com minérios com teor de ferro da ordem de 55% em média, sendo as principais nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará (DNPM, 2016).

Na Figura 21, tem-se um fluxograma simplificado indicando as principais etapas do processo, que começa com a concentração e separação de impurezas, logo depois o material é empilhado junto com os aditivos, recuperado e moído através de moinhos e/ou prensa de rolos para ajustar as propriedades físicas da mistura de minérios às exigências do pelotamento e processamento térmico. Em seguida, inicia-se a etapa de pelotização e, por último, as pelotas cruas dirigem-se ao forno para o processamento térmico. O produto final, após o peneiramento, será encaminhado para o pátio de estocagem de pelotas (TAETS, L. A. R., 2014).



Fonte: Elaboração própria com base em TAETS, L. A. R. (2014)

Figura 21: Fluxograma simplificado do processo produtivo de pelotização

5.a.i.2) Fontes de energia

No processo de produção das pelotas de minério de ferro, a energia elétrica é utilizada para a força motriz, acionamento de motores e iluminação, enquanto a energia térmica é utilizada no forno de endurecimento das pelotas e nos equipamentos móveis (recuperadoras, empilhadeiras, caminhões, etc.).

O principal combustível utilizado do forno de pelotização é o gás natural, que tem como finalidade a geração de calor para atingir a temperatura adequada à queima e endurecimento das pelotas.

O óleo combustível é utilizado como combustível alternativo ao gás natural, na falta deste insumo (sistema de *backup*).

O óleo diesel é utilizado como combustível dos equipamentos móveis na usina de pelotização.

O coque de petróleo e o carvão são adicionados ao “*pellet feed*” e são misturados para melhor homogeneização e enviados à etapa de aglomeração, onde serão produzidas as pelotas cruas. Cabe ressaltar que estes além de serem fontes de energia, no processo de pelletização, também são usados como insumo para a composição das pelotas, gerando energia (através de uma reação exotérmica), que será transferida para a pelota com a finalidade de garantir uma queima uniforme (MOURÃO, J. M., 2017).

O Antracito é o combustível sólido mais utilizado na pelletização, em vista da grande disponibilidade no mercado mundial. No Brasil, também é explorado, porém em menor escala, de forma que é adquirido via importação. Esse combustível, adicionado às pelotas cruas, tem um papel de grande relevância ao acelerar o processo de queima, ao substituir o combustível externo de custo mais elevado e ao melhorar a eficiência energética do forno, com resultado significativo na redução dos consumos de calor e energia elétrica. (MOURÃO, J. M., 2017)

5.a.i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Em média, 24,6% do consumo total do subsegmento é de energia elétrica frente a 75,4% de energia térmica.

O forno de pelletização é o principal consumidor de energia térmica, e o do gás natural é a principal fonte de energia queimada no forno, seguida pelo coque de petróleo, carvão e o óleo combustível (*backup*).

A Tabela 5 apresenta a distribuição dos motores por etapa do processo.

Etapa de produção	Distribuição da potência	Distribuição do número de motores	Faixa de potência (MW)
Concentração	46%	16%	0,6 a 8,4
Filtragem	12%	25%	0,53 a 2,3
Roller press	5%	5%	1,5
Pelotamento	4%	27%	0,2
Forno e periféricos	29%	17%	1 a 9,9
Pátio de estocagem e porto	5%	10%	0,8

Fonte: elaboração própria de acordo com visita de campo

Tabela 5: Distribuição de motores nas etapas produtivas na produção de pelotas.

Os principais consumidores de energia elétrica, segundo informações disponibilizadas pelas usinas, são os motores que acionam os equipamentos abaixo, que estão associados aos estágios do processo de concentração, filtragem, mistura, pelotamento e endurecimento:

- Empilhadeira;
- Recuperadora;
- Moinho;
- Hidrociclone;
- Homoginizadores;
- Filtro de disco;

- Misturador de aditivos;
- Discos de pelotamento;
- Forno de queima de pelotas;
- Peneira;
- Equipamentos para estoque e embarque.

Dessa forma, para melhor entendimento, classifica-se as principais etapas produtivas por unidade de serviço da seguinte forma:

Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Ilum	Eletr	Outros
Preparo da matéria-prima							
Formação de pelotas cruas							
Processamento térmico							
Classificação e estocagem							

Legenda: FM: Força motriz; CP: Calor de processo; AD: Aquecimento direto; Ilum: Iluminação; Electr: Electroquímica; Outros: Outros usos finais.

Fonte: Elaboração própria com base em dados de campo

Tabela 6: Distribuição por serviço energético no segmento de pelotização

5.a.i.4) Indicadores energéticos

Consumo Específico

O consumo específico médio de energia elétrica do processo de pelotização é de 0,007 tep por tonelada métrica seca (tms) de pelota (81,46 kWh/tms), e o consumo específico médio de energia térmica é de 0,021 tep/tms.

As distribuições de consumos específicos elétricos e térmicos por etapas são mostradas nas Tabelas 7 e 8 respectivamente.

Etapas do Processo	Consumo Específico (kWh/tms)	Consumo Específico (tep/tms)
1. Preparo da matéria-prima (Concentração, Moagem, filtragem, mesclador, outros processos)	51,35	0,0044
2. Formação de pelotas cruas	2,89	0,0003
3. Forno e periféricos	23,24	0,0020
4. Classificação e estocagem	3,97	0,0004
Total	81,46	0,0070

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 7: Consumo específico de energia elétrica por etapa

Etapa do Processo	Fonte de Energia	Consumo Específico (tep/tms)
3. Fornos e periféricos	Gás natural, coque de petróleo, carvão e óleo combustível	0,0212
4. Classificação e estocagem (Caminhões, empilhadeiras, recuperadoras)	Óleo diesel	0,0003
Total		0,0215

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo e dados das empresas visitadas

Tabela 8: Consumo específico de energia térmica por etapa no forno de pelotização

Rendimento Energético

O conceito de rendimento energético refere-se apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo e ele retrata a média dos rendimentos de transformação. A Tabela 9 apresenta os valores obtidos:

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	40,2	-	-	-	-
Carvão	-	-	40,2	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	45,0	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	40,2	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Alto-forno	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Elettricidade	96,1	-	-	-	37,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	40,2	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

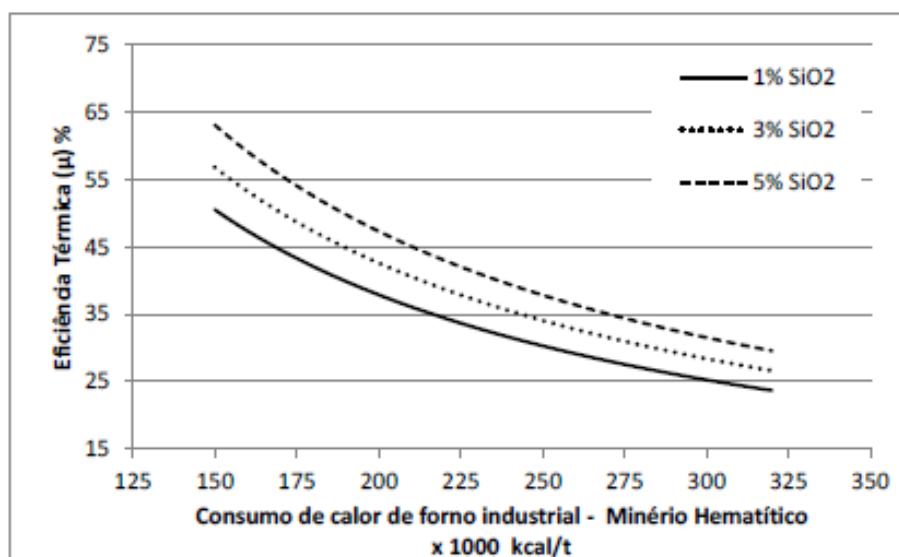
Fonte: Elaboração própria com base em Kuberczyk et al (2009), MOURÃO, J. M. (2017) e em pesquisa de campo

Tabela 9: Indicadores de rendimento energético atuais, do subsegmento de Pelotização

O rendimento energético do forno tipo *Travelling Grate* de pelotização foi obtido considerando os fluxos de calor e as perdas do forno. Nos fluxos de calor foram consideradas as seguintes etapas:

1. Aquecimento e vaporização da água;
2. Processo de calcinação;
3. Reação de Escorificação;
4. Aquecimento das Pelotas;
5. Oxidação da Magnetita;
6. Recuperação de calor das pelotas.

O calor teórico para produzir 1 tonelada de pelotas queimadas é de 85.212 Kcal/t, segundo MOURÃO, J. M. (2017). A energia média consumida na amostra das plantas de pelotização foi de 212.046 Kcal/t, o que representa um rendimento térmico atual de 40,19%. O mesmo consumo térmico com economia de 10,69% alcança o rendimento de 45% que pode também ser observado no Gráfico 8.



Fonte: MOURÃO, J. M. (2017)

Gráfico 8: Eficiência no uso da energia térmica para fornos de pelotização

O rendimento é afetado principalmente pelo tipo de minério utilizado, seja hematita ou magnetita, e pela composição de sílica.

Nas perdas térmicas estão representadas: as perdas por refratário do forno, fuga de gases quentes, perda de calor pelos carros que entram e saem com o transporte de material, entrada de ar frio por diferença de pressões entre o ambiente e o forno.

É importante ressaltar que o rendimento atual da força motriz equivale ao rendimento atual dos motores elétricos em 96,1% e a iluminação corresponde às luminárias convencionais do tipo fluorescente e de vapor de sódio, com rendimentos de 37%, com base nas pesquisas de campo.

Coeficientes de Destinação

Na Tabela 10, os coeficientes de destinação fazem referência às porcentagens que são destinadas a cada uso final da energia.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	100,0	-	-	-	-	-	-	100,0
Óleo Combustível	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Alto-forno	-	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	99,5	-	-	-	0,5	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	100,0
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	100,0	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 10: Coeficientes de destinação atuais, do subsegmento de Pelotização

5.a.i.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Vários equipamentos em operação nas plantas são antigos e se houver necessidade de substituí-los, serão adquiridos equipamentos mais modernos e com tecnologia mais recente, como é o caso de motores de alto rendimento. Portanto, estes investimentos já deverão contemplar a atualização tecnológica.

No entanto, durante as visitas técnicas, foram fornecidas informações sobre a substituição de equipamentos críticos que não alteram a tecnologia dos processos produtivos, mas que podem aumentar a eficiência energética e melhorar a qualidade dos produtos nas diversas etapas do processo. A Tabela 11 mostra os componentes ou partes de equipamentos, que contribuem para melhoria da eficiência energética, e os investimentos necessários para a substituição.

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objetivo desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, mas foram considerados os equipamentos com maior consumo de energia elétrica. Portanto, foi realizada uma

amostragem dos equipamentos que mais impactam no consumo de energia e seus preços para o ano base 2017, em reais, sem o transporte, pois esse difere de região para região.

INVESTIMENTOS NECESSÁRIOS PARA REPOSIÇÃO DE EQUIPAMENTOS ENERGOINTENSIVOS DA PLANTA COM NÍVEL SEMELHANTE DE EFICIÊNCIA		
Equipamentos	Valor	Unidade Moeda
Rotores dos ventiladores de processo dos fornos	1,6 - 2,8 milhões / ventilador	R\$
Substituição de filtros a vácuo antigos por mais novos	0,5 milhões / filtro	R\$
Substituição das bombas de vácuo antigas por modelos mais novos	2,5 milhões / bomba	R\$
Discos de pelotização	7,5 milhões / disco	R\$

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 11: Investimentos necessários para reposição de equipamentos com tecnologia similar

O principal consumo elétrico provém dos motores de condições *standard*, que podem ser substituídos por motores de alto rendimento. A etapa de pelotamento (acionamento dos discos de pelotização do pellet feed) utiliza motores de até 500 CV. Na Tabela 12, são relacionados os custos dos motores de acordo com estas condições, enquanto os custos dos motores mais eficientes são relacionados no parágrafo de condições com tecnologia mais eficiente, no item ii5.

Motores <i>Standard</i>	Custo R\$
Motores <i>Standard</i> (250 CV)	62.845

Foram considerados motores de 250 CV com 6 pólos. Adotou-se a linha de motores W22 IR2 Trifásico

Fonte: WEG (2018)

Tabela 12: Investimentos Motores *Standards*

Ainda que a iluminação tenha uma participação muito baixa no consumo de energia elétrica, a mesma é importante no ponto de vista do potencial de economia dada a grande diferença de rendimentos das luminárias atuais para as melhoradas. Os custos das luminárias atuais são apresentados na Tabela 13.

Lâmpadas de uso atual	Custo
Lâmpada vapor de sódio - 200 W	R\$ 22,00
Lâmpada vapor de sódio - 400 W	R\$ 46,90
Lâmpada fluorescente - 40W	R\$ 9,60
Lâmpada fluorescente - 20W	R\$ 4,65

Fonte: FG (2018)

Tabela 13: Investimentos Lâmpadas de uso atual

Em relação ao consumo térmico, o principal consumidor é o forno de queima de pelotas, sendo largamente utilizado o forno tipo *Travelling Grate*. Este é um equipamento com um custo de investimento muito alto e os investimentos para condições atuais são, em sua maioria, com relação às melhorias físicas do forno, que permitem aumentar a eficiência térmica, principalmente no que corresponde ao isolamento térmico, redução de fugas de calor e aproveitamento do calor gerado durante a etapa de resfriamento das pelotas.

5.a.ii Condições com tecnologias mais eficientes

5.a.ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

O processo de produção não se modifica pelas tecnologias mais eficientes, o que se busca é aumentar a eficiência energética de acordo com a modernização dos equipamentos de processo e a substituição de motores atuais de eficiência *standard* por motores de alta eficiência.

Nos equipamentos com potências maiores que 500 CV, a substituição de motores representa investimentos muito altos e sua troca obedece a modernização de equipamentos.

Dado que os motores maiores que 500 CV representam 97% do consumo de energia, as medidas operacionais refletidas em tempos de paradas e arranque são muito significativas para os motores de grande potência e para os equipamentos de transporte ligados a cada um dos equipamentos principais. Por esta razão recomenda-se a implementação de medidas de automatização e controle que permitam reduzir os tempos desnecessários durante o arranque e a parada para os equipamentos, o qual acontece quando se inicia novamente um processo ou quando se apresentam paradas não programadas em operação.

A seleção do tipo de motor maior que 500 CV, tem incidência na qualidade e confiabilidade do serviço emprestado, é por isso que é recomendado o uso de motores de indução de rotor bobinado, o qual permite reduzir o desgaste das escovas, são fabricados com sistema eletromecânico que permite o curto-circuito dos anéis coletores e levantamento das escovas logo após a partida. Estes motores contribuem a sua vez a manter níveis de eficiência maiores que 95,5% (WEG, 2018).

Pelos altos custos que representam a troca de motores com mais de 500 CV, requer avaliar o estado dos motores tanto pelo estado mecânico como pelo elétrico, mediante um analisador que permite avaliar o estado elétrico do rotor e o estator dos motores; como também problemas de estrutura interna e de rolamentos. Esta ação permite tomar decisões para manutenção que repercute na eficiência elétrica do equipamento. Com uma manutenção preditiva em motores se pode conseguir que a eficiência se mantenha nos níveis de desenho.

Análise para os dois tipos de fornos que são utilizados nos processos de pelotização

Para o processo térmico existem dois tipos de fornos utilizados: *Travelling Grate* e o *Rotary Kiln*.

No forno do tipo Grelha Móvel (*Travelling Grate*), as etapas de secagem, queima e resfriamento são realizadas na mesma câmara e as pelotas permanecem estáticas nos carros que são colocados no forno para o processo. Este tipo de forno tem uma vantagem sobre o Rotary Kiln, podendo ser utilizados diferentes tipos de minérios, como hematita ou magnetita.

Este tipo de forno é utilizado em plantas de pelotização no Brasil e tem a vantagem de não só poder utilizar diferentes materiais, mas também de consumir menos energia no processo (MOURÃO, J. M., 2017).

O forno tipo *Rotary Kiln* é composto por três reatores: o primeiro tem uma grelha móvel, o segundo é um tambor inclinado onde as pelotas ficam em movimento e o terceiro, um reator que corresponde a um corpo circular para realizar o resfriamento. Este forno, atualmente, possui limitações para o uso de minérios tipo hematíticos ou hidratados, como limoníticos.

Uma grande limitação que existe é que na grelha móvel com materiais hematíticos são apresentados muitos finos que levam à perda de material. Outro ponto é o comportamento estrutural das pelotas neste primeiro reator e na fase de pré-aquecimento, que faz com que nas seguintes etapas do forno sejam apresentadas trocas nas pelotas de oxidação e recristalização, refletidas na resistência e no aglomerado. As pelotas do mineral magnetita podem suportar as operações dos dois reatores seguintes.

A maior limitação do forno tipo *Rotary Kiln* é o tempo de permanência, que é de 70 minutos, enquanto que no *Travelling Grate* é a metade, que se reflete em um maior consumo térmico.

Considerando o acima exposto, a troca de forno não é incluída como uma opção de medida de economia e de acordo com o material de mineração mais utilizado no país, como a hematita, os fornos Traveling Grate continuarão sendo utilizados, mas buscando maior eficiência (TAETS, L. A. R., 2014).

Medidas térmicas para o forno tipo *Travelling Grate* (TG – grelha móvel)

As medidas térmicas propostas para o forno tipo *Travelling Grate* são relacionadas a seguir e através das mesmas pode-se conseguir um aumento da eficiência de 40% para 45% (MOURÃO, J. M., 2017). Este aumento da eficiência representa 10,6% de economia dos energéticos utilizados nestes fornos.

- Redução das perdas por transmissão de calor através de paredes refratárias e dutos do forno

As perdas por transmissão de calor são importantes de serem reduzidas pelo estado do material refratário e pelo estado de isolamento dos dutos, já que o volume de ar em movimento é alto, e pela temperatura nas câmaras de combustão que são superiores a 1300°C.

- Aumentar a recuperação de calor no processo de resfriamento do forno

Como o processo de resfriamento é iniciado com uma temperatura alta de 1300°C até uma temperatura de 100°C, é necessário remover grande quantidade de calor. Por esta razão, deve-se otimizar este processo de resfriamento mediante o aproveitamento térmico do ar que remove este calor, utilizando-o para o processo de queima de pelotas por pré-aquecimento do ar. Outro fator é a temperatura final das pelotas, que se puder ser levada a 250°C, proporciona uma redução das perdas por resfriamento.

- Reduzir a entrada de ar frio por problemas de vedação e pressões negativas nas câmaras do forno

A pressão de operação nas câmaras do forno é muito próxima a zero. Na medida em que a pressão do forno é muito baixa, criam-se pressões negativas, o que conduz a um aumento da entrada de ar ambiente.

- Reduzir perdas de calor através dos carros das grelhas

Como os carros das grelhas saem e entram no forno, apresenta-se uma troca de calor com o ambiente. Na medida em que se reduz o tempo de reentrada de cada carro, perde-se menos energia.

- Otimizar a altura das pelotas no leito de secagem

Na medida em que a cama de pelotas é menor, apresenta-se menos perda de calor, para isso, deve-se ajustar a altura das pelotas no leito.

Em resumo, a eficiência vai depender preferencialmente do tipo de mineral e da composição de sílica, ou seja, se é do tipo hematita ou magnetita, do tamanho das pelotas, da porosidade do leito e da temperatura de secagem (MOURÃO, J. M., 2017).

A seguir encontram-se algumas medidas de eficiência energética que foram indicadas durante as visitas realizadas:

a) Atualização tecnológica dos britadores de alto rendimento:

Substituição dos britadores por novos com maior rendimento no processo de britagem. Algumas medidas incluem instalação de motores elétricos de alto rendimento, redutores e moto redutores acionados por inversores de frequência para britadores, células de flotação, bombas de lama e de moinho com e sem engrenagens.

b) Utilização de moinhos Semi Autógeno (SAG):

Na moagem autógena completa, ou FAG, o minério, que vem da mina sem nenhuma ou com pouca britagem, é alimentado todo no moinho autógeno. No classificador que trabalha acoplado ao moinho, o material é retirado na granulometria desejada.

Os moinhos autógenos usam minério para fazer a moagem, mas se a dureza e abrasividade do minério não é bem processada, uma pequena carga de esferas de aço é adicionada para ajudar no procedimento, o que pode torná-lo um moinho SAG.

Na moagem semi autógena faz-se o uso de algumas bolas de aço para facilitar a fragmentação de uma fração mais resistente à moagem e com tendência a manter-se muito tempo no moinho, ou retornar várias vezes do classificador como carga circulante.

O processo de moagem semi autógena, com a utilização de moinho SAG, apresenta três principais vantagens: reduz o desgaste do metal, elimina as etapas adicionais de trituração e diminui os custos financeiros e operacionais, incluindo o consumo energético.

c) Atualização tecnológica de filtros prensa e bombas vácuo:

Substituição de bombas de alto rendimento da estação de filtragem a vácuo do concentrado e instalação de filtros prensa, para obter maior eficiência no sistema de filtragem e consequente redução do consumo de energia elétrica.

d) Melhorar a classificação do carvão:

Aumentar a eficiência da mistura de concentrado, coque de petróleo e carvão, para melhorar a eficiência da queima no forno de pelletização e redução do consumo de gás natural. A mistura do pellet feed tem impacto na eficiência da queima da pelota e consequentemente na redução do consumo de gás natural.

e) Substituir mesas classificadoras de pelota

Permite maior eficiência na seleção das pelotas por tamanho e melhora a qualidade da pelota crua, que terá impacto direto na redução do consumo de energia elétrica e gás natural no forno de pelletização. A eficiência do processo de classificação é medida pela homogeneidade do tamanho das pelotas para um maior rendimento da queima no forno.

f) Retrofit das usinas obsoletas:

Através da atualização do sistema de queima das pelotas, substituição das caixas de vento para melhorar o fluxo de ar, melhorar a permeabilidade do leito e modificações no processo. Com o retrofit, espera-se uma redução no consumo de energia elétrica e no consumo de gás natural.

g) Utilização de biomassa para queima nos fornos de pelletização:

Ainda não foi testada em operação industrial contínua, para determinar a porcentagem de substituição parcial do consumo de gás natural e a consequente redução no custo final dos combustíveis (PRAES, G. E., FONSECA, M. C., e outros, 2015). Cabe ressaltar que não necessariamente resulta em ganhos de eficiência energética.

5.a.ii.2) Fontes de energia

As principais fontes de energia na condição de tecnologias mais eficientes não serão modificadas, continuarão sendo as mesmas descritas na situação atual, no item 5.a.i.2. deste relatório.

5.a.ii.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores de energia permanecerão os mesmos, não havendo modificação do processo de produção das pelotas. Todas as alternativas tecnológicas e projetos de eficiência energética descritos irão impactar na redução do consumo de energéticos e aumento da produtividade dos processos.

5.a.ii.4) Indicadores energéticos

Consumo Específico

O consumo de eletricidade em força motriz tem um destino de 99,5% da energia consumida na planta. Ao efetuar a substituição de motores elétricos *standard* por motores de alta eficiência com potências menores que 500 CV, o consumo específico corresponderá ao que é mostrado na seguinte tabela. A energia dos motores substituídos de *Standard* para alta eficiência representa 3% do consumo total dos motores.

Etapa do Processo	Tecnologias mais eficientes	% de economia	Consumo Específico Melhorado(kWh/t)	Consumo Específico (tep/tms)
1. Preparo da matéria-prima (Concentração, Moagem, filtragem, misturador, outros processos)*	- Substituição de motores por alto rendimento; - Otimizar os circuitos de captação de água; - Melhoria do rendimento das bombas de polpa; - Atualização tecnológica do circuito de moagem secundária dos concentradores; - Atualização tecnológica dos britadores de alto rendimento; - Atualização tecnológica da flotação mecânica do Concentrador; - Utilização de moinhos SAG;	ND	51,21	0,0044
2. Formação de pelotas cruas	- Substituição de motores standard por motores de alta eficiência com potências menores que 500 HP	0,62%	2,86	0,0002
3. Forno e Periféricos**	- Substituição das caixas de vento e modificações no processo.	ND	23,18	0,0020
4. Classificação e estocagem**	- Medidas de operacionais nos transportadores para saída de produto terminado.	ND	3,96	0,0003
Total***		0,30%	81,21	0,00698

Notas:

* Para motores com potências maiores que 500 CV para as etapas incluídas na preparação da matéria prima (etapas de moagem e que compreende equipamentos como o hidrociclone, espessador, tanque homogeneizador, filtragem, misturador) se recomenda ações de manutenção, sem efetuar troca de motor, visto que estes motores comercialmente não apresentam um grande potencial de eficiência.

** Para motores com potências maiores que 500 CV com ênfase no forno tipo Traveling Grate, na Peneira, nos transportadores para saída de produto terminado, na empilhadeira e na recuperadora para embarque de minério. Se recomenda ações de manutenção, mas sem efetuar troca de motor, visto que estes motores comercialmente não apresentam grande potencial de eficiência.

***inclui potencial de substituição de sistema de iluminação atual para sistema com lâmpadas a led. Fonte: HTL (s.d.)

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 14: Consumo específico de energia elétrica por etapa após implementação de projetos de retrofit e eficiência energética

Ao implementar as medidas propostas para aumentar a eficiência energética do forno de queima de pelotas, o consumo específico melhorado é mostrado na Tabela 15. As medidas são relacionadas para reduzir perdas de transferência de calor, para otimizar a altura das pelotas na grelha, e para aumentar o aproveitamento do calor no processo de resfriamento. A eficiência do forno em termos gerais é de 40% e busca-se alcançar 45% com as medidas propostas (MOURÃO, J. M., 2017).

Etapa do Processo	Tecnologias mais eficientes	% de Economia	Fonte de Energia	Consumo Específico (tep/tms)
3. Fornos e periféricos	*- Redução de perda por transmissão de calor através das paredes refratárias e dutos do forno. - Aumentar a recuperação de calor no processo de resfriamento do forno. - Redução entrada de ar frio por problemas em selagens e pressão negativa nas câmaras do forno (vácuo). - Redução perda de calor através dos carros de grelha (temperaturas de saída/reentrada no forno) - Otimizar a altura das pelotas no leito de secagem.	10,69%	Gás natural, coque de petróleo, carvão e óleo combustível	0,0189
4. Classificação e estocagem (Caminhões, empilhadeiras, recuperadoras)	- Utilização de biodiesel na frota de caminhões*.	ND	Óleo diesel	0,0003
Total		10,54%		0,0192

* Resulta em redução de emissões de GEE, mas não necessariamente em ganhos de eficiência energética.

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 15: Consumo específico de energia térmica após implementação de medidas de economia no forno

Rendimento Energético

A Tabela 16 mostra a média dos rendimentos nas etapas do processo produtivo melhorado.

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	45,0	-	-	-	-
Carvão	-	-	45,0	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	45,0	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	45,0	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Alto-forno	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Elettricidade	97,7	-	-	-	37,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	45,0	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base em Kuberczyk et al (2009), MOURÃO, J. M. (2017) e em pesquisa de campo
Tabela 16: Indicadores de rendimento energético na situação alternativa, do subsegmento de Pelotização

Coeficientes de Destinação

Na Tabela 17, os coeficientes de destinação fazem referência às porcentagens que são destinadas a cada uso final da energia.

Os valores obtidos tiveram modificação apenas no energético correspondente à energia elétrica devido à parcela energética melhorada com as propostas de substituição de motores e sistema de iluminação.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	100,0	-	-	-	-	-	-	100,0
Óleo Combustível	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Alto-forno	-	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	99,8	-	-	-	0,2	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	100,0
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	100,0	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 17: Coeficientes de destinação na situação alternativa, do subsegmento de Pelotização

5.a.ii.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

Para a economia de energia elétrica foi considerada a medida de substituição de motores *standard* por motores de alta eficiência e troca de iluminação de lâmpadas fluorescentes, halógenas e de sódio por lâmpadas LED, obedecendo às mesmas condições de iluminação existentes.

Outras medidas que são referentes às ações de manutenção nos equipamentos de processo e o potencial de economia não foram quantificados por se tratar de substituições parciais de componentes.

A seguir são relacionados os custos para motores de alta eficiência com potências até 500 CV.

Motores de alta eficiência	Custo R\$
Motores de alto rendimento (250 CV)	70.645

Foram considerados motores de 250 CV com 6 pólos. Adotou-se linha de motores W22 IR3 Premium Trifásico.

Fonte: WEG (2018)

Tabela 18: Investimentos Motores de alto rendimento

E na Tabela 19, são apresentados os custos de luminárias tipo LED, que podem substituir as luminárias atualmente utilizadas como fluorescente, halógenas e de sódio.

Luminárias tipo LED	Custo
High Bay LED Industrial (100 W)	R\$ 499,00
High Bay LED Industrial (200 W)	R\$ 1.060,00
Led tubular (18W)	R\$ 68,00
Led tubular (9W)	R\$ 22,00

Fonte: FG (2018)

Tabela 19: Investimentos Lâmpadas tipo LED

A maior parte dos projetos de eficiência energética e de atualização tecnológica (*retrofit*) considerados no planejamento de longo prazo da amostra ainda estão na fase conceitual e poucos na fase de estudo de viabilidade.

A estimativa do CAPEX (Capital Expenditure) preliminar para estes investimentos está na faixa de US\$ 17 a US\$ 23 por tonelada anual.

Poucos investimentos passaram para a fase de pré-viabilidade, com estimativas preliminares do CAPEX. A Tabela 20 mostra a lista destes investimentos.

Equipamentos	Custo	Informação adicional
Fitragem Press	50 milhões / filtro	Aumento da eficiência energética elétrica
Moinhos SAG	-	Aumento da eficiência energética elétrica
<i>Retrofit</i> forno de pelotização	50 milhões / forno	Aumento da eficiência energética térmica
Queimadores de biomassa nos fornos de pelotização	7,5 milhões / forno	Redução dos custos de energia devido a substituição de combustível
Instalação de caixas secas no forno de pelotização	3 milhões / forno	Aumento da eficiência energética térmica
Implementação de redução de carga circulante no processo de pré-moagem	6 milhões	Aumento da eficiência energética elétrica
Discos de pelotização	7,5 milhões / disco	Aumento de produção

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 20: Lista de projetos em fase de pré-viabilidade da amostra¹

Na Tabela 21, é mostrada a energia economizada pela substituição de motores de alto rendimento menores que 500 CV, e a energia economizada pela implementação de medidas de economia térmicas no forno de queima das pelotas.

¹ Não necessariamente projetos que objetivam a eficiência energética.

Medidas	Fonte	Custo Investimento Atual (R\$/t produzida)	Custo Investimento (R\$/t)	% Economia de energia	Economia (tep/t)
Substituição de motores de alto rendimento de até 500CV na etapa de formação de pelotas cruas ¹	Eletricidade	0,11	0,13	0,62%	0,00024
Substituição de sistema de iluminação atual para sistema a lâmpadas a led	Eletricidade	-	0,27	54,81%	0,00002
Otimizar a altura das pelotas no leito de secagem	Gás natural, Óleo combustível, Coque de petróleo, Carvão (antracito)	-	17,5	10,69%	0,0023
Reduzir as perdas de calor no forno		-			
Aumentar a recuperação de calor no processo de resfriamento do forno		-			

¹ Não necessariamente projetos que objetivam a eficiência energética. Foram considerados motores de 250 CV com 6 pólos. Para o atual adotou-se o W22 IR2 Trifásico e para o melhorado o IR3 Premium Trifásico.

Fonte: WEG (2018), MOURÃO, J. M. (2017) e TAETS (2014)

Tabela 21: Investimento do subsegmento de pelotização

Os potenciais de economia por fonte energética de acordo com a aplicação das medidas são mostrados na Tabela 22. A maior porcentagem de economia corresponde ao aquecimento direto, referente às medidas no forno.

Fonte de energia (tep/t)	Força motriz	Aquecimento direto	Iluminação	Total (%)
Gás Natural	-	0,00103	-	10,69%
Carvão	-	0,00038	-	10,69%
Óleo Diesel	-	-	-	0,00%
Óleo Combustível	-	0,00012	-	10,69%
Eletricidade	0,00011	-	0,00002	1,91%
Outras F. Sec. Petr.	-	0,00074	-	10,69%
Total (%)	1,64%	10,69%	56,47%	8,42%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 22: Potencial de economia do segmento de pelotização

5.b. Subsegmento Produção de Gusa

5.b.i. Situação atual

5.b.i.1) Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

As empresas selecionadas são produtoras de ferro-gusa a partir de granulado de minério de ferro e carvão vegetal. Apenas uma das empresas visitadas utiliza o sinter produzido em unidade de sinterização dentro da própria usina e as outras utilizam o minério de ferro granulado. O ferro-gusa produzido é uma liga de ferro e carbono, contendo de 3,5 a 4,5% de carbono e outros elementos residuais como silício, manganês, fósforo, enxofre e entre outros.

As empresas têm capacidade instalada entre 240.000 e 550.000 toneladas por ano de ferro-gusa e operam com o fator de capacidade médio de 80%.

As principais etapas do processo de obtenção do ferro-gusa começam com a preparo das matérias-primas, onde estão incluídos: o recebimento, a lavagem, a secagem, o processamento e classificação carvão vegetal.

Para obter o ferro-gusa são depositados, em um alto-forno, o minério de ferro, o combustível e o fundente, onde uma grande quantidade de ar aquecido ativa a queima do combustível, dando origem a reações químicas que acarretarão na redução do minério e sua transformação em gusa. As usinas visitadas utilizam carvão vegetal como combustível, porém podem existir usinas de produção de gusa que usem coque adquiridos de terceiros.

Além do ferro-gusa, obtém-se também no processo a escória de alto-forno e grande quantidade de gases.

O material utilizado como fundente é o calcário que por sua vez, é uma combinação de cálcio com carbono e oxigênio. Sua função é ajudar o minério de ferro a se fundir, que juntamente com as impurezas do minério forma a escória que ficará líquida e se depositará na superfície do ferro-gusa por ser mais leve.

Os combustíveis são muito importantes na fabricação do ferro-gusa, pois precisam ter um alto poder calorífico. Isso quer dizer que têm de gerar muito calor e não podem contaminar o metal obtido.

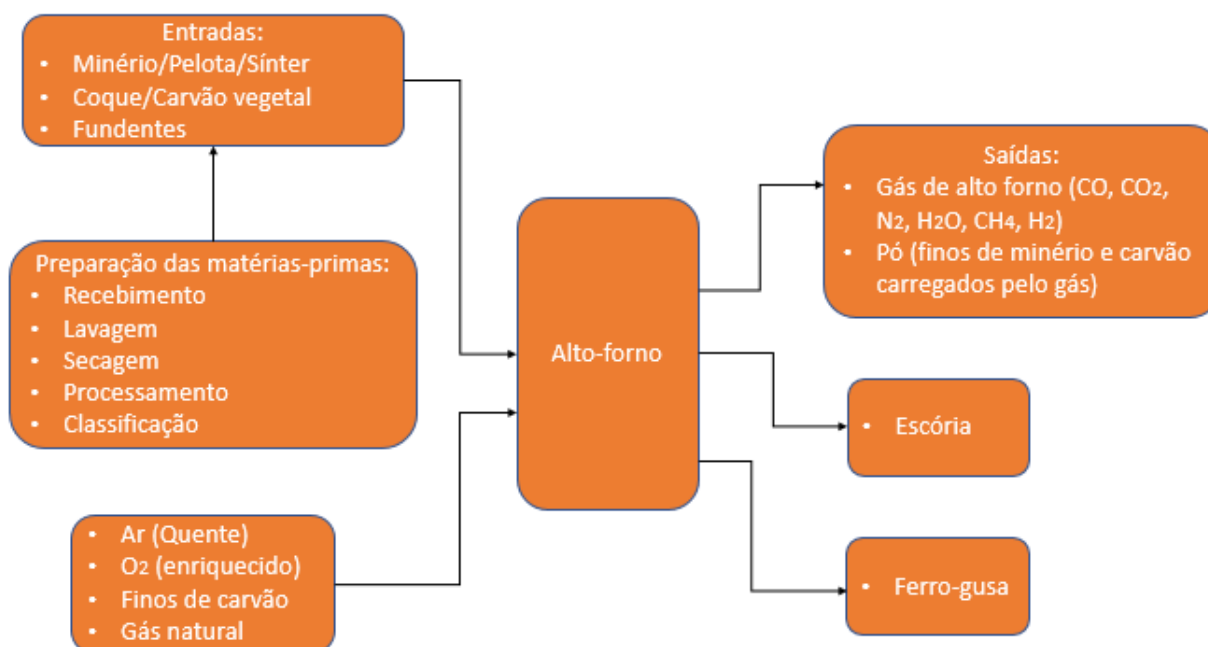
Dois tipos de combustíveis são utilizados: o carvão vegetal ou o coque metalúrgico. Porém, por possuir propriedades e alto grau de pureza, o carvão vegetal é considerado um combustível de grande qualidade e o principal para o subsegmento. O consumo de carvão vegetal dos produtores independentes de gusa, no ano de 2008, foi de 72,3% do consumo de carvão vegetal a nível nacional, enquanto que para o mesmo ano, nas usinas integradas, correspondeu a um consumo de 17,3% (JUNIOR, A. D. S., 2011). Suas duas grandes desvantagens são a necessidade de áreas de plantio e corte das árvores (e é possível que em alguns casos haja desflorestamento de mata nativa) e a baixa resistência mecânica, bastante relevante no alto-forno, pois o combustível fica localizado embaixo da carga e precisa aguentar todo o seu peso (SENAI, 2000).

O carvão mineral produz o coque, que é o outro tipo de combustível usado no alto-forno. Para que ele tenha bom rendimento, deve apresentar um elevado poder calorífico e alto teor de carbono, além de apresentar grande resistência ao esmagamento para resistir ao peso da coluna de carga.

Além de serem combustíveis, tanto o coque quanto o carvão vegetal têm mais duas funções: gerar o gás redutor ou agir diretamente na redução e assegurar a permeabilidade à coluna da carga. Isso quer dizer que eles permitem que o calor circule com facilidade através da carga.

Juntando essas matérias-primas dentro do alto-forno, obtém-se o ferro-gusa, a partir do qual se fabrica o aço e o ferro fundido.

A Figura 22 mostra o processo de produção de ferro-gusa simplificado.



Fonte: Elaboração própria com dados de AURÉLIO (2010)

Figura 22: Fluxograma do processo de produção de ferro-gusa simplificado

5.b.i.2) Fontes de energia

Neste subsegmento, foi quantificado pelas visitas de campo que, em média, 1,5% do consumo total do subsegmento é de energia elétrica e 98,5% de energia térmica.

No processo de produção do ferro-gusa, a energia elétrica é consumida nos sistemas de força motriz e iluminação e a energia térmica é consumida no alto-forno, nos regeneradores (*glendons*) e os gases gerados no processo são utilizados para o aquecimento do ar nos regeneradores e nas caldeiras para a produção do vapor destinado à cogeração de energia elétrica.

O principal combustível utilizado nos altos-fornos das empresas visitadas é o carvão vegetal. Uma grande quantidade de ar aquecido nos regeneradores (*glendons*) ativa a queima do combustível, fundindo a carga e dando origem às reações químicas que acarretarão na redução do minério e sua transformação em gusa.

Os finos de carvão (moinha), obtidos da fração fina do carvão vegetal, também são utilizados na injeção das ventaneiras do alto-forno junto com o ar aquecido, ajudando no processo de queima do combustível e consequentemente reduzindo o consumo de carvão vegetal por tonelada de ferro-gusa produzido.

O gás de alto-forno contém de 21 a 25% de CO, 18 a 22% de CO₂, 2 a 5% de H₂, possuindo 700 a 800 kcal/Nm³ de poder calorífico e por isso ele é recuperado e usado como combustível (BATISTA, A. A. M., 2009). O gás é limpo (no sistema de limpeza de gases), colocado em uso para a geração de vapor nas caldeiras de cogeração de energia elétrica e para o aquecimento do ar nos regeneradores (*glendons*), que será soprado nas ventaneiras do alto-forno.

As empresas visitadas utilizam contratos de energia no mercado livre, estando conectadas nos sistemas das concessionárias de distribuição. Todas as empresas visitadas possuem caldeiras de alta pressão com cogeração.

O percentual de consumo de cada energético para o subsegmento é mostrado na Tabela 22.

Energético	% de consumo total
Óleo Diesel	0,6%
Eletricidade	1,5%
Carvão Vegetal	69,6%
Gás de Alto-forno	28,3%

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 23: Fontes de energia utilizadas na produção de Gusa

5.b.i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

O alto-forno é o principal equipamento consumidor de energia térmica, através do carvão vegetal, que é um combustível e fonte do gás redutor do minério de ferro.

Segundo as empresas visitadas, os regeneradores (*glendons*) consomem em torno de 60% do gás de alto-forno para o aquecimento do ar e a cogeração de energia elétrica consome 40% do gás de alto-forno para a produção de vapor na caldeira. O vapor produzido na caldeira é utilizado para a geração de energia elétrica através de uma turbina a vapor. O vapor permanece em circuito fechado na termelétrica e não é utilizado para consumo final na usina. Portanto, não existe consumo final de vapor significativo no processo da produção de gusa.

Os principais equipamentos consumidores de energia elétrica são os eletro sopradores da sala de máquinas para as ventaneiras do alto-forno, motores diversos para as correias

transportadoras e sistemas de peneiramento e lavagem do minério de ferro e carvão vegetal, motores para o sistema de PCI (*Pulverized Coal Injection*) e bombas para o circuito de refrigeração do alto-forno e da torre de refrigeração da UTE (Unidade Termoeletrica de Cogeração).

Dessa forma, para melhor entendimento, abaixo são classificadas as principais etapas produtivas por serviço energético.

Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Ilum	Eletr	Outros
Preparo da matéria-prima							
Alto-forno							

Legenda: FM: Força motriz; CP: Calor de processo; AD: Aquecimento direto; Ilum: Iluminação; Electr: Electroquímica; Outros: Outros usos finais.

Fonte: Elaboração própria com base em dados de campo

Tabela 24: Distribuição das etapas de processo nas unidades de serviço de produção de ferro-gusa

5.b.i.4) Indicadores energéticos

Consumo Específico

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria de produção de ferro-gusa apresenta um consumo específico médio de energia elétrica em torno de 107 kWh por tonelada de gusa, com variação em relação à média na ordem de apenas 2%. O consumo específico médio térmico do processo está em torno de 6126 kWh por tonelada de gusa (88,5%) e de 796,4 kWh por tonelada de gusa (11,5%) para a cogeração de energia elétrica na UTE. O consumo térmico específico médio deste subsegmento está em torno de 0,536 tep (variando de 0,504 a 0,598 tep).

Energético	Valor min (tep/t Gusa)	Valor médio (tep/t Gusa)	Valor max (tep/t Gusa)
Óleo Diesel	0,0009	0,0035	0,0058
Eletricidade	0,0090	0,0092	0,0092
Carvão Vegetal	0,4025	0,4206	0,4490
Gás de Alto-forno*	0,0914	0,1027	0,1341
Total	0,5038	0,5360	0,5980

* Considera 60% do consumo total de gás de alto-forno, que é o consumo final. Os 40% restantes são para geração de eletricidade.

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 25: Consumos específicos do subsegmento de Gusa, valores mínimos, médios e máximos

Rendimento Energético

O conceito de rendimento energético refere-se apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo e ele retrata a média ponderada dos rendimentos de transformação, conforme explicado no item 4.c deste relatório. Segue a tabela abaixo com os valores obtidos, correspondentes à média ponderada de rendimentos das plantas:

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	-	-	-	-	-
Carvão	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	45,0	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Alto-forno	-	-	53,1	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Elettricidade	94,0	-	-	-	37,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	39,3	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base em Kuberczyk et al (2009), VIEIRA, D. D. C., OLIVEIRA, T. L. (2016), MONTEIRO, M. A. (2004), WEG (2018) e pesquisa de campo

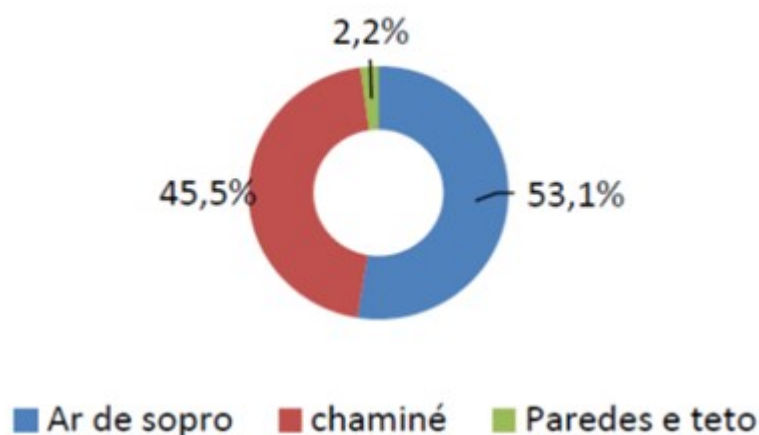
Tabela 26: Indicadores de rendimento energético atuais, do subsegmento de Produção de Gusa

Aquecimento direto – gás do alto-forno

A eficiência térmica do *glendon* tem grande importância dentro da usina siderúrgica, pois ele é responsável por aquecer o ar soprado no alto-forno, e assim contribuir para a redução do consumo do carvão vegetal para a produção do gusa. Para realizar o aquecimento do ar de combustão nos trocadores de calor é utilizada parte dos gases que saem do topo do alto-forno. Estes gases são devidamente purificados e queimados nos trocadores de calor (*glendons*). Os *glendons* possuem um regime de trabalho contínuo. O ar quente é então conduzido ao anel de vento e injetado no alto-forno através das ventaneiras.

A Figura 23 mostra a eficiência térmica de 53,1% calculada em um *glendon*. A perda pelos gases da chaminé é de 45,5% e a perda pelas paredes e teto de aproximadamente 2,2%. É clara uma grande perda de energia pelos gases de chaminé, se aproximando da eficiência térmica do *glendon*.

Saídas de energia de combustão



Fonte: VIEIRA, D. D. C., OLIVEIRA, T. L. (2016)

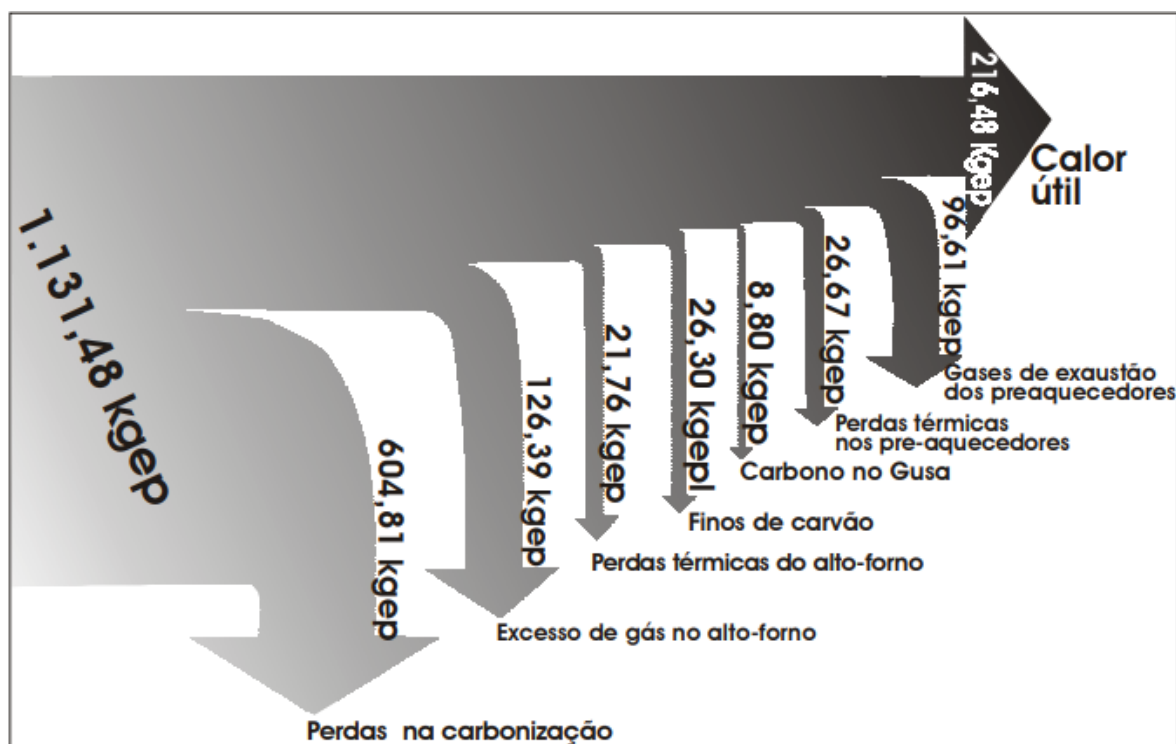
Figura 23: Saída de energia do glendon

As empresas produtoras de gusa não calculam o balanço energético dos *glendons*. Neste caso, optou-se por utilizar o rendimento teórico com base na fonte indicada acima, como referência para o subsegmento de gusa.

Aquecimento direto - carvão vegetal

Devido à restrição de informações nas empresas visitadas sobre o rendimento do carvão vegetal no alto-forno foi utilizado o balanço estabelecido por MONTEIRO, M. A. (2004) para altos-fornos nas empresas de gusa independentes.

Na Figura 24 são mostrados os requisitos energéticos para produção de 1 tonelada de ferro-gusa. Esse balanço começa a partir da energia fornecida na lenha para ser transformada em carvão vegetal e sua posterior utilização no alto-forno.



Fonte: MONTEIRO, M. A. (2004)

Figura 24: Balanço energético em unidades originais para produção de 1 ton de ferro-gusa

Na primeira etapa são apresentadas as perdas de transformação do carvão vegetal e posteriormente as perdas no alto-forno. De acordo com esse balanço, o rendimento do carvão vegetal no alto-forno é de 37%, ao considerar que no alto-forno o carvão vegetal que chega tem 580,23 kgep e seu aproveitamento térmico em gusa é de 216,48 kgep. A energia nos gases de saída corresponde a 96,61 kgep. Onde, 1kgep equivale a 41,9MJ.

Força motriz – transporte

Estima-se que o rendimento médio de motores a diesel para transporte está na faixa de 45%, que são os principais no setor de gusa, para o transporte de minério, carvão e calcário em caminhões e equipamentos internos na usina, como pás carregadeiras, empilhadeiras e pequenos veículos (KUBERCZYK, R., BERNER, HJ. & BARGENDE M., 2009).

Força motriz - motores elétricos

Os motores elétricos são responsáveis pelo maior percentual do consumo de energia elétrica nas plantas produtoras de gusa. O rendimento dos motores depende de muitas variáveis como, o tipo do motor, potência, tensão de operação, utilização, regime de operação, entre outros.

Os equipamentos que consomem maior quantidade de energia são os motores dos eletro sopradores da sala de máquinas, para a injeção do ar nas ventaneiras do alto-forno, e os

motores e bombas do sistema de refrigeração do alto-forno e da unidade de cogeração de energia elétrica. A potência destes motores está na faixa de 100 cv a 400 cv. Nos motores maiores onde a velocidade é menor o desempenho é maior. Portanto, dada a diversidade dos motores, adotou-se o rendimento médio de 94% correspondente a um motor de 250CV, 4 pólos e tecnologia W22 IR2 (WEG, 2018).

Iluminação

As empresas visitadas usam lâmpadas de vapor metálico e vapor de sódio para a iluminação das áreas industriais e áreas externas. A iluminação dos escritórios é feita com lâmpadas fluorescentes convencionais. As empresas já estão substituindo as lâmpadas convencionais por lâmpadas LED, aumentando a eficiência da iluminação e reduzindo o consumo de energia. O rendimento energético da iluminação atual é de aproximadamente 37%.

Coeficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação fazem referência às porcentagens de energia que são destinadas a cada uso final de energia.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	-	-	-	-	-	-
Carvão	-	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	100,0	-	-	-	-	-	-	100,0
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Alto-forno	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	95,0	-	-	-	5,0	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	100,0	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	100,0
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa de campo

Tabela 27: Coeficientes de destinação atuais, do subsegmento de produção de Gusa

5.b.i.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos:

Vários equipamentos em operação nas plantas são antigos e se houver necessidade de substituí-los, serão adquiridos equipamentos mais modernos e com tecnologia mais

recente, como é o caso de motores de alto rendimento e lâmpadas de alta eficiência e maior vida útil, como as lâmpadas LED.

No entanto, durante as visitas técnicas, foram fornecidas informações sobre a substituição de equipamentos críticos que não alteram a tecnologia dos processos produtivos, mas que podem aumentar a eficiência energética e melhorar a qualidade dos produtos nas diversas etapas do processo. A Tabela 28 mostra os referidos equipamentos e os investimentos necessários para a substituição.

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objetivo desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos. Portanto, foi realizada uma amostragem de alguns equipamentos e seus preços para o ano base 2017 em reais sem o transporte, pois esse difere de região para região, a seguir:

Investimentos associados às medidas	Custo
Lâmpada vapor de sódio 200 W	R\$ 22,00
Lâmpada vapor de sódio 400 W	R\$ 46,90
Lâmpada fluorescente - 40W	R\$ 9,60
Lâmpada fluorescente - 20W	R\$ 4,65
Motores <i>Standard</i> (5 CV)	R\$ 1.712,00
Motores <i>Standard</i> (50 CV)	R\$ 11.727,00
Motores <i>Standard</i> (75 CV)	R\$ 16.620,00
Motores <i>Standard</i> (100 CV)	R\$ 20.687,00
Motores <i>Standard</i> (150 CV)	R\$ 37.728,33
Motores <i>Standard</i> (200 CV)	R\$ 52.656,23
Motores <i>Standard</i> (250 CV)	R\$ 62.844,88
Motores <i>Standard</i> (300 CV)	R\$ 95.628,11
Motores <i>Standard</i> (400 CV)	R\$ 108.611,63
Economizador de caldeira a vapor	R\$ 1.000.000,00
Planta de PCI (Pulverized Coal Injection)	US\$ 6.500.000,00 (1)

(1) Planta de PCI com capacidade inicial de aproximadamente 10t/h para injeção de carvão vegetal pulverizado em dois altos-fornos, incluindo obra civil e montagem.

Fonte: WEG ano base 2018, FG ano base 2017 em pesquisa de campo (1)

Tabela 28: Investimentos necessários para reposição de equipamentos com tecnologia similar

5.b.ii. Condições com tecnologias mais eficientes

5.b.ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As principais linhas de processo e as etapas de produção do ferro-gusa não sofrerão mudanças significativas com a adoção de tecnologias mais eficientes.

As mudanças irão ocorrer na redução do consumo do principal energético, o carvão vegetal. Com relação à eficiência elétrica, as principais oportunidades são a utilização de motores de alto rendimento e iluminação a LED, além de ações de gestão adequadas.

O consumo de energia térmica corresponde a 98,5% do total do consumo de energia em uma planta de produção de gusa e a fonte principal da energia térmica é o carvão vegetal. Sendo assim, os maiores esforços para melhorar a eficiência energética devem se concentrar em novas tecnologias que permitam a redução do consumo específico de carvão vegetal por tonelada de gusa produzido.

Na Tabela 29 são mostradas as medidas de eficiência energética referentes ao subsegmento de gusa que foram identificadas durante as visitas às plantas.

Medidas de eficiência energética no subsegmento de gusa	Maturidade da tecnologia	Redução de consumo de energia térmica	Redução de consumo de energia elétrica
Redução do consumo de carvão vegetal com PCI (Pulverized Coal Injection)	Comercial		
Injeção de oxigênio (O ₂) no PCI do alto-forno	Comercial		
Injeção de gás natural no alto-forno	Piloto		
Utilização de pó de balão como combustível	Piloto		
Aumento da eficiência energética dos glendons	Comercial		
Eficiência no uso da energia elétrica: Motores AR	Comercial		
Eficiência no uso da energia elétrica: lâmpadas LED	Comercial		
Sistemas de Gestão	Comercial		

Legenda Magnitude de Impacto:

Alto Médio Baixo Não se aplica

Fonte: Elaboração própria

Tabela 29: Medidas de eficiência energética identificadas para o subsegmento de Gusa

Redução do consumo de carvão vegetal com PCI (Pulverized Coal Injection)

Essa medida consiste em utilizar os finos de carvão (moinha) na injeção das ventaneiras do altos-fornos junto com o ar aquecido, ajudando no processo de queima do combustível e, consequentemente, reduzindo o consumo de carvão vegetal por tonelada de ferro-gusa produzido. O processo de injeção de carvão pulverizado (Pulverized Coal Injection - PCI) para os altos-fornos tem como objetivo substituir parcialmente o carvão vegetal carregado pelo topo do alto-forno.

O carvão pulverizado propicia um maior retorno econômico, quando utilizado no processo de fabricação do ferro-gusa, pois permite a maior capacidade de taxa de injeção ao se comparar com o emprego de óleos, gases e outros hidrocarbonetos. Isto aumenta a produção e melhora as condições ambientais e econômicas do processo siderúrgico dos altos-fornos como um todo.

A vazão do carvão pulverizado deve ser controlada para que a sua combustão tenha um melhor desempenho e eficiência, além de se obter margens de segurança na operação e manutenção desta fase do processo.

- Objetivo e vantagens do PCI:

O objetivo do PCI é a economia no desembolso do combustível e redutor, ou seja, a redução do custo de produção de gusa. Outras vantagens advêm do PCI, mas não se deve perder o foco de sua implantação - economia do carvão vegetal.

A substituição de parte do carvão vegetal pelo PCI pode desempenhar duas das três funções básicas do carvão vegetal, que são prover uma fonte de calor e servir como fonte de gás redutor. Em síntese, os seguintes benefícios são derivados do emprego da tecnologia do PCI em altos-fornos:

- Redução de custos pela substituição do carvão vegetal por moinha de baixo custo, devendo reduzir o custo energético dependendo do material injetado e mudanças operacionais;
- Elevação de produtividade devido ao uso de enriquecimento do ar soprado com oxigênio.

O potencial de redução de energia do carvão vegetal com a substituição por finos de carvão vegetal pulverizado é de 25%, tendo em conta que aproximadamente 85% da energia de entrada no alto forno na produção de ferro-gusa é proveniente do carvão vegetal (SOARES, L. N., 2011).

Injeção de oxigênio no PCI do alto-forno

O oxigênio pode ser injetado no alto-forno para melhorar a combustão e facilitar a injeção complementar de carvão pulverizado. O oxigênio é necessário em qualquer processo de combustão, através do enriquecimento ou substituição do ar de combustão por oxigênio.

O processo de combustão pode ser otimizado devido ao aumento da taxa de transferência de calor, temperaturas de chama mais elevadas e redução do volume dos gases de combustão. A viabilidade econômica dependerá do investimento nos injetores e na central

de produção de O_2 ou no custo de aquisição do O_2 no mercado (*Air Products*). O potencial estabelecido experimentalmente é de 4% de economia com a utilização do enriquecimento de oxigênio (YAMAGUCHI, K.; UENO, H.; TAMURA, K., 1992).

Injeção de gás natural no alto-forno

Uma das empresas visitadas está fazendo estudos para implementar a injeção de gás natural no alto-forno. O alto teor de carbono contido no GN e também o H_2 , ajudarão nos processos de aquecimento e redução do minério de ferro, reduzindo o consumo de carvão vegetal e promovendo o enriquecimento do gás de alto-forno, que tem baixo poder calorífico e é produzido em pequena quantidade. A meta é a de utilizar até 10% de GN. O gás do alto-forno com maior poder calorífico aumentará o rendimento dos *glendons* e da cogeração de energia elétrica. (SOARES, L. N., 2011).

Utilização de pó de balão como combustível

O pó de balão ou pó do coletor é um resíduo gerado no processo de limpeza do gás de alto-forno. É comum ser reciclado como material de adição na carga das sinterizações de minérios. Visto que o pó de balão desempenha a função de combustível na mistura a sinterizar, decidiu-se avaliar se seria capaz de exercer essa mesma função quando misturado ao carvão pulverizado do alto-forno e substituir parte dessa massa de carvão.

A energia do pó de balão obtida no processo é de 0,63 GJ/tonelada de ferro-gusa. Os resultados de testes realizados no alto-forno, quando se adiciona pó ao carvão pulverizado injetado, mostrou que o pó prejudica a combustão do PCI, o que faz com que esteja sendo investigada a aplicação desta tecnologia (SILVA, H. P., 2016).

Outra alternativa seria a gaseificação do pó de balão para injetar o gás nas ventaneiras do alto-forno, porém o alto custo do investimento em um gaseificador provavelmente não teria viabilidade econômica. Não foram encontrados estudos referentes à gaseificação do pó de balão.

Aumento da eficiência energética dos *glendons*

Aumento da eficiência energética dos *glendons*: após alguns trabalhos realizados com instalação de chicanas nos *glendons*, foi possível elevar a eficiência para 67,4%. A inclusão das chicanas se mostrou mais efetiva do que a redução da área de passagem dos gases da combustão, e promoveu um aumento na eficiência energética dos *glendons* de 53,1% para 67,4%. O objetivo da utilização de chicanas foi fazer com que o fluxo dos gases da combustão fosse cruzado ao fluxo de ar no interior das serpentinas e a turbulência do escoamento externo fosse aumentada, aumentando assim a troca de calor (VIEIRA, D. D. C., OLIVEIRA, T. L., 2016).

Eficiência no uso da energia elétrica - Motores Alto Rendimento

Nas indústrias, os pontos principais de ineficiência energética são os motores elétricos e a iluminação. Observa-se que para o subsegmento de produção de gusa, na ordem de 95% da energia elétrica é empregada em força motriz. Torna-se evidente, portanto, a relevância

que os motores elétricos assumem no consumo de eletricidade por parte deste subsegmento.

Deste modo, numa perspectiva de melhoria de eficiência energética, torna-se fundamental analisar as ações que podem ser tomadas, como a adequação da potência do motor à carga, o uso de inversores de frequência e o uso de motores de alto rendimento.

Quanto aos motores de alto rendimento, são em geral mais caros que os motores *standard* ou motores normais de linha, mas podem apresentar vantagens significativas em diversos casos, devido ao seu rendimento superior.

Os motores de alto rendimento são projetados tendo em conta a maximização do seu rendimento sem aumentar desproporcionalmente o custo de fabricação. Para tal, é feita uma otimização tanto do processo de dimensionamento, como da escolha e aplicação de todos os materiais empregados na sua fabricação, de modo a minimizar as perdas de energia que ocorrem durante a operação do motor.

Como resultado deste processo de otimização, os motores de alto rendimento costumam operar a uma temperatura mais baixa, resultando numa vida útil maior dos mesmos. Além disso, apresentam uma menor necessidade de manutenção e também um menor nível de ruído devido ao melhor balanceamento e menores tolerâncias de fabricação.

Potência Nominal (cv)	Velocidade Síncrona (rpm)			
	3600	1800	1200	900
	Rendimento Nominal (%)			
10	87,5	90,0	89,0	87,5
15	89,5	91,7	90,2	91,2
20	90,2	91,8	91,0	91,0
25	91,0	92,5	92,2	92,0
30	91,7	92,2	93,0	92,3
40	92,0	92,7	93,3	93,0
50	91,8	93,0	93,5	93,3
60	91,7	93,4	93,6	93,1
75	92,4	93,9	93,8	93,7
100	93,1	94,3	94,2	94,3
125	93,0	94,4	94,5	94,7
150	93,0	95,0	94,7	94,9
200	94,7	95,0	95,3	95,2
250	95,0	95,5	95,2	94,9

Fonte: ELETROBRÁS (2006)

Tabela 30: Rendimento mínimo para motores de alta eficiência

Eficiência no uso da energia elétrica - Lâmpadas LED

Com relação à mudança da tecnologia na iluminação, recomenda-se a utilização de lâmpadas de LED.

Atualmente, a lâmpada mais eficiente é a LED (*Light Emitting Diode*), isso porque sua eficiência luminosa é maior do que as das outras lâmpadas. Ou seja, gasta-se menos energia para gerar a mesma iluminação. O baixo consumo de energia, vida útil mais longa (aproximadamente 50.000 horas) e menor impacto ambiental, pois não utilizam mercúrio ou qualquer outro elemento que cause danos à natureza e tampouco emitem radiação ultravioleta ou infravermelha, são as principais características das LED, além de atualmente serem fabricadas em vários formatos para atender às mais diversas atividades e ambientes, com significativos índices de economia.

A tabela abaixo mostra as equivalências e o potencial de economia de energia entre as lâmpadas LED e as lâmpadas de vapor metálico e de sódio, que são as mais utilizadas no subsegmento de produção de ferro-gusa.

Lâmpada LED	Lâmpada Convencional	Economia de energia
LED High Power 30W	Vapor Metálico/Sódio 70W+21W (reator)	67%
LED High Power 60W	Vapor Metálico/Sódio 150W+45W (reator)	69%
LED High Power 72W 360°	Vapor Metálico/Sódio 150W+45W (reator)	63%
Refletor LED 30W	Vapor Metálico/Sódio 70W+21W (reator)	67%
Refletor LED 50W	Vapor Metálico/Sódio 100W+30W (reator)	61%
Refletor LED 120W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%
Refletor LED 200W	Vapor Metálico/Sódio 400W+120W (reator)	63%
High Bay LED Industrial 50W	Vapor Metálico/Sódio 100W+30W (reator)	61%
High Bay LED Industrial 100W	Vapor Metálico/Sódio 200W+60W (reator)	61%
High Bay LED Industrial 120W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%
High Bay LED Industrial 200W	Vapor Metálico/Sódio 400W+120W (reator)	63%
LED Outdoor 84W	Vapor Metálico/Sódio 200W+60W (reator)	67%
LED Outdoor 112W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%
LED Outdoor 120W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%

Fonte: HTL (s.d.)

Tabela 31: Equivalência entre lâmpadas LED e convencionais

Sistema de gestão

A implementação de um sistema de gestão de energia eficiente tem como benefícios: economizar energia, reduzir custos e atender às exigências ambientais. Essa medida é aplicável a organizações de todos os tipos e tamanhos, independentemente das suas condições geográficas e o potencial de economia está relacionado ao estabelecimento de objetivos, metas e planos de ação na política energética adotada. A referência obtida de economia de energia em setores industriais foi de até 10% (ISO 50001 IET) e foi adotado por informação obtida nas visitas um potencial de 7,5% para gerenciamento de eletricidade e 10% para energia térmica.

5.b.ii.2) Fontes de energia

As principais fontes de energia na condição de tecnologias mais eficientes não serão modificadas, a energia elétrica continuará a ser utilizada para a força motriz e iluminação e a energia térmica no alto-forno, nos regeneradores (*glendons*) e nas caldeiras para a produção de vapor e cogeração de energia elétrica.

O carvão vegetal e o gás de alto-forno permanecem como principais combustíveis.

5.b.ii.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores de energia permanecerão os mesmos, não havendo mudança na tecnologia do processo de produção do ferro-gusa. Todas as alternativas tecnológicas descritas referem-se à redução do consumo de energéticos e aumento da eficiência energética dos processos.

5.b.ii.4) Indicadores energéticos

Consumo Específico

O consumo específico médio de energia elétrica das plantas produtoras de gusa que foram visitadas está em torno de 107,21 kWh por tonelada de gusa. Este consumo poderia ser reduzido em até 4,35%, para 102,54 kWh por tonelada de gusa, com a implementação das medidas de eficiência energética.

O consumo específico médio de carvão vegetal, de 650 Kg por tonelada de gusa (0,421 tep/ton gusa), poderá ser reduzido em até 8,82% para 592 Kg por tonelada de gusa (0,383 tep/ton gusa).

Energético	Valor médio (tep/t Gusa)
Óleo diesel	0,0035
Eletricidade	0,0088
Carvão vegetal	0,3834
Gás de alto-forno	0,0881
Total	0,4839

Fonte: Elaboração própria

Tabela 32: Consumos específicos melhorados do subsegmento de Gusa

Força motriz – transporte

Foi considerado que não haverá mudança no rendimento dos motores para transporte, que são os principais no setor de gusa, para o transporte de minério, carvão e calcário em caminhões e equipamentos internos na usina, como pás carregadeiras, empilhadeiras e pequenos veículos.

Aquecimento direto - carvão vegetal

O aumento do rendimento energético do carvão vegetal para a produção do gusa com a injeção do PCI no alto-forno é difícil de ser medido ou calculado. O balanço energético da

entrada e saída do carvão vegetal no alto-forno, incluindo a injeção do PCI, deverá permanecer o mesmo e grande parte da energia nas perdas será reaproveitada no gás de alto-forno e no carbono contido nos finos de carvão e no gusa.

Força motriz - motores elétricos

O aumento do desempenho em motores elétricos é alcançado pelo uso de motores de alta eficiência. As performances são variáveis de acordo com os tamanhos, velocidade, tipo de motor, nível de tensão. Motores na faixa de 100 cv a 400 cv apresentam maior oportunidade de mudança de acordo com as informações de desempenho relacionadas nos catálogos de motores (WEG, 2018).

Iluminação

A substituição das lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de vapor metálico por lâmpadas LED, aumentará o rendimento energético da iluminação, de 37,0% para 85,00% (HTL, s.d).

Rendimento Energético

O conceito de rendimento energético refere-se apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo e ele retrata a média dos rendimentos de transformação.

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	-	-	-	-	-
Carvão	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	45,0	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Alto-forno	-	-	67,4	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Elettricidade	95,5	-	-	-	85,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	39,3	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base em Kuberczyk et al (2009), VIEIRA, D. D. C., OLIVEIRA, T. L. (2016), MONTEIRO, M. A. (2004) e pesquisa de campo

Tabela 33: Indicadores de rendimento energético situação com tecnologias mais eficientes, do subsegmento de produção de Gusa

O uso do carvão injetado pulverizado (PCI) ajuda a reduzir o consumo de carvão vegetal com benefícios econômicos do total de combustível usado para o alto-forno, pela diferença de custos entre o carvão vegetal e o carvão pulverizado, na energia fornecida.

Coeficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação fazem referência às porcentagens de energia que são destinadas a cada uso final de energia.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	-	-	-	-	-	-
Carvão	-	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	100,0	-	-	-	-	-	-	100,0
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Alto-forno	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	97,6	-	-	-	2,4	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	100,0	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	100,0
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 34: Coeficientes de destinação da situação com tecnologias mais eficientes, do subsegmento de produção de Gusa

5.b.ii.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

Foram identificados alguns custos médios para as medidas comercialmente aplicadas no segmento de gusa e algumas recomendações no sistema térmico, como injeção de oxigênio no PCI, aumento de eficiência energética nos *glendons*. O investimento é estudado e aplicado a cada caso. E para recomendações de troca de motores e sistema de iluminação, foram identificados equipamentos que poderiam ser substituídos facilmente por outros mais eficientes.

Medidas de eficiência energética no subsegmento de gusa	Maturidade da tecnologia	Fonte	Custo investimento atual (R\$/t produzida)	Custo investimento (R\$/t produzida)	% economia de energia	Economia (tep/t)
Redução do consumo de carvão vegetal com PCI (Pulverized Coal Injection) (1)	Comercial	Carvão vegetal	-	7,29	10,00%	0,01546
Injeção de oxigênio (O2) no PCI do alto-forno (2)	Comercial	Carvão vegetal	-	ND	4,00%	0,00618
Aumento da eficiência energética dos glendons	Comercial	Gás de alto-forno	-	ND	39,96%	0,01466
Substituição de motores standard por motores de alto rendimento	Comercial	Eletricidade	1,75	1,91	1,64%	0,00005
Substituição do sistema de iluminação existente por lâmpadas LED	Comercial	Eletricidade	0,06	1,3	54,91%	0,00009
Sistemas de gestão em equipamentos elétricos	Comercial	Eletricidade	-	ND	7,50%	0,00026
Sistemas de gestão em equipamentos térmicos	Comercial	Carvão vegetal	-	ND	10,00%	0,01546

(1) Planta de PCI com capacidade inicial de aproximadamente 10t/h para injeção de carvão vegetal pulverizado em dois altos-fornos, incluindo obra civil e montagem.

(2) os fabricantes não vendem esse sistema, o que ocorre são adequações dos queimadores e instalação de tanques de Oxigênio no sistema. O oxigênio utilizado no sistema de queima, reduz o consumo do gás natural.

Fonte: WEG (2018), FG (2017), ANEEL (2015)

Tabela 35: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas nota-se o potencial total de 4,1%, impulsionados principalmente pela melhora no sistema térmico, conforme a Tabela 36.

Fonte de energia (tep/t)	Força motriz	Aquecimento direto	Iluminação	Total (%)
Óleo Diesel	-	-	-	0,0%
Gás De Alto-forno	-	0,0078	-	21,22%
Eletricidade	0,0001	-	0,0001	4,32%
Carvão Vegetal	-	0,0371	-	24,00%
Total (%)	1,06%	23,5%	56,5%	22,95%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 36: Potencial de economia do subsegmento de gusa

5.c. Subsegmento de Produção de Aço via Plantas Integradas a Carvão Mineral e a Carvão Vegetal e Plantas que Essencialmente Reaproveitam Sucata Metálica para a Produção de Aço

Para realização desse estudo, o IABr e suas associadas foram contatados pelos representantes do consórcio Qualitec-Applus e da EPE em 2017, possibilitando a realização de reuniões presenciais para apresentação do estudo “Análise de Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados”.

Alinhadas com o objetivo de promover o aperfeiçoamento das ferramentas de projeção de demanda e energia que serão utilizadas no desenvolvimento de estudos de eficiência energética, e considerando a relevância desse estudo, as empresas siderúrgicas colaboraram com o fornecimento dos dados do setor.

A coleta por empresas e a consolidação dos dados deste segmento foi realizada pelo IABr que empregou em grande parte a metodologia utilizada no Balanço de Energia Global – BEG, conduzido pela Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM (ABM, 1997). A utilização desta metodologia permitiu uma uniformização das premissas empregadas, padronização dos equivalentes caloríficos (utilidades) e dos poderes caloríficos, garantindo comparabilidade e evitando desta maneira a ocorrência de dupla contagem na consolidação dos dados.

As informações fornecidas foram agregadas em três conformações industriais (tipologias), denominadas Rotas, segundo a classificação adotada pela EPE em seu documento “Energia do Setor Siderúrgico” (EPE, 2009):

Rota 1: Integradas com Produção de Coque;

Rota 2: Integradas sem Produção de Coque;

Rota 3: Semi-Integradas.

Essas tipologias, Rota 1, 2 e 3, foram adotadas por caracterizarem as unidades instaladas no território nacional, e por possibilitarem a agregação dos dados pelo IABr sem a exposição individualizada das usinas, atendendo assim aos critérios de *Compliance* das empresas.

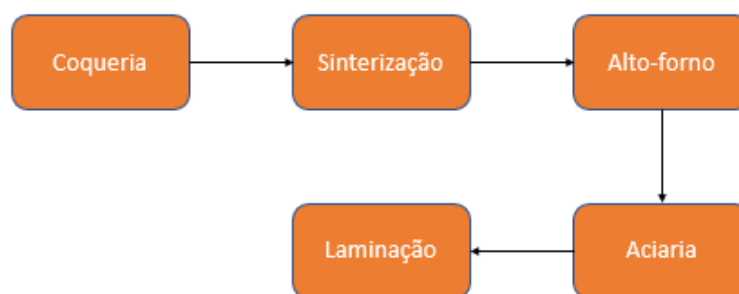
5.c1 Subsegmento Produção de Aço via Plantas Integradas (Rota 1)

5.c1.i. Situação atual

Neste tópico, serão apresentados os dados consolidados das empresas siderúrgicas que correspondem à Rota 1.

5.c1.i.1) Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

Na Figura 25 são apresentadas as principais etapas do processo de produção de aço via rota tecnológica com coqueria.



Fonte: Elaboração própria

Figura 25: Diagrama de blocos simplificado do processo produtivo das plantas de aço integradas com coqueria

5.c1.i.2) Fontes de energia

Segundo os dados coletados pelo IABr, referente à Rota 1, o consumo específico dos energéticos, no ano base de 2015, é apresentado na Tabela 37 e a produções energéticas na Tabela 38:

Rota 1: Integradas com Coque Próprio								
Energético (Consumo)	Coqueria	Sinterização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Sistema de Energia e Outros	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	15,009	0,449						15,458
Finos de Carvão			3,839					3,839
Coque Metalúrgico		1,226	11,116	0,001				12,343
Coque Petróleo	1,131							1,131
Gás de Coqueria	0,339	0,039	0,419	0,025	0,482	0,467	0,029	1,800
Gás de Alto-forno	0,547		1,504		0,046	2,924	0,462	5,483
Gás de Aciaria	0,017	0,008	0,122	0,008	0,068	0,283	0,308	0,814
Gás Natural	0,004	0,045	0,142	0,093	0,490	0,453		1,227
Alcatrão e Derivados						0,103		0,103
Óleo Combustível					0,001	0,003		0,004
Óleo Diesel						0,030		0,030
GLP				0,000				0,000
Gasolina						0,001		0,001
Energia Elétrica	0,204	0,552	0,488	0,466	1,110	1,197		4,017
Gases do Ar	0,026	0,001	0,555	0,549	0,092	0,054		1,277
Outras Fontes			0,175					0,175
Consumo Total	17,277	2,320	18,360	1,142	2,289	5,515	0,799	47,702

Produção de aço exclusiva à Rota 1

Fonte: IABr (2018)

Tabela 37: Distribuição de consumo total de energia na Rota 1, em GJ/t de aço bruto

Energético (Produção)	Coqueria	Sinterização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Sistema de Energia e Outros	Flare	Consumo por energético
Coque Metalúrgico	10,942							10,942
Gás de Coqueria	1,800							1,800
Gás de Alto-forno			5,483					5,483
Gás de Aciaria				0,813				0,813
Alcatrão e Derivados	0,298							0,298
Energia Elétrica						3,763		3,763
Gases do Ar						0,428		0,428
Produção Total	13,040	0,000	5,483	0,813	0,000	4,191	0,000	23,527

Produção de aço exclusiva à Rota 1

Fonte: IABr (2018)

Tabela 38: Distribuição de produção de energia na Rota 1, em GJ/t de aço bruto

Vale atentar que nas Tabelas 37 e 38, o consumo de transformação² é considerado. Portanto, para considerar apenas o consumo final³ de energia da rota deve-se seguir os seguintes itens:

- Desconsiderar os centros de transformação do processo siderúrgico: Nas etapas de coqueria e sistema de energia e outros, há transformação de energia em outras fontes, como coque metalúrgico e eletricidade.

Portanto, as Tabela 39 e 40 correspondem a distribuição de consumo energético da Rota 1 sem a participação dessas etapas.

Rota 1: Integradas com Coque Próprio						
Energético (Consumo)	Sinterização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	0,449					0,449
Finos de Carvão		3,839				3,839
Coque Metalúrgico	1,226	11,116	0,001			12,343
Coque Petróleo						0,000
Gás de Coqueria	0,039	0,419	0,025	0,482	0,029	0,994
Gás de Alto-forno		1,504		0,046	0,462	2,012

² Consumo de transformação: O setor transformação agrupa todos os centros de transformação, onde a energia que entra (primária e/ou secundária) se transforma em uma ou mais formas de energia secundária com suas correspondentes perdas na transformação.

³ Consumo final: Energia Primária e Secundária que se encontra disponível para ser usada por todos os setores econômicos de consumo final do país e famílias, incluindo o Consumo Final Energético e o Consumo Final Não-Energético.

Rota 1: Integradas com Coque Próprio						
Energético (Consumo)	Sinterização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Gás de Aciaria	0,008	0,122	0,008	0,068	0,308	0,514
Gás Natural	0,045	0,142	0,093	0,490		0,770
Alcatrão e Derivados						0,000
Óleo Combustível				0,001		0,001
Óleo Diesel						0,000
GLP			0,000			0,000
Gasolina						0,000
Energia Elétrica	0,552	0,488	0,466	1,110		2,616
Gases do Ar	0,001	0,555	0,549	0,092		1,197
Outras Fontes		0,175				0,175
Consumo	2,320	18,360	1,142	2,289	0,799	24,910

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 39: Distribuição de consumo de energia na Rota 1, em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar as etapas de transformação

Energético (Produção)	Sinterização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Coque Metalúrgico						0,000
Gás de Coqueria						0,000
Gás de Alto-forno		5,483				5,483
Gás de Aciaria			0,813			0,813
Alcatrão e Derivados						0,000
Energia Elétrica						0,000
Gases do Ar						0,000
Produção	0,000	5,483	0,813	0,000	0,000	6,296

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 40: Distribuição de produção energética na Rota 1, em GJ/t de aço bruto, após a eliminação das etapas de transformação

- b) Descontar nas etapas, de alto-forno e aciaria, a produção de energéticos que serão reutilizados em outras etapas de produção de aço: Os montantes de produção desses energéticos foram descontados proporcionalmente entre as fontes das etapas correspondentes com propósito de evitar dupla contagem.

Portanto, a Tabela 41 corresponde à distribuição de consumo final da Rota 1 com esse tratamento de dados.

Rota 1: Integradas com Coque Próprio						
Energético (Consumo final)	Sinterização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	0,449					0,449
Finos de Carvão		2,693				2,693
Coque Metalúrgico	1,226	7,796				9,022
Coque Petróleo						0,000
Gás de Coqueria	0,039	0,294	0,007	0,482	0,029	0,851
Gás de Alto-forno		1,055		0,046	0,462	1,563
Gás de Aciaria	0,008	0,086	0,002	0,068	0,308	0,472
Gás Natural	0,045	0,100	0,027	0,490		0,661
Alcatrão e Derivados						0,000
Óleo Combustível				0,001		0,001
Óleo Diesel						0,000
GLP						0,000
Gasolina						0,000
Energia Elétrica	0,552	0,342	0,134	1,110		2,139
Gases do Ar	0,001	0,389	0,158	0,092		0,640
Outras Fontes		0,123				0,123
Consumo Final	2,320	12,877	0,329	2,289	0,799	18,614

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 41: Consumo final de energia para produção de aço na Rota 1, em GJ/t de aço bruto

c) Adequar os energéticos conforme o Balanço de Energia Útil (BEU): Para adaptação da metodologia internacional utilizada como base do BEU foi necessário realocar os energéticos conforme apresentado a seguir, resultando na Tabela 42.

- Carvão = carvão mineral + finos de carvão + carvão metalúrgico nacional⁴;
- Outras fontes primárias = gás de alto-forno + gás de aciaria + gases do ar + outras fontes;
- Gases de processo = gás de coqueria;
- Coque de carvão mineral = coque metalúrgico;
- Eletricidade = energia elétrica;
- Outras fontes secundárias = coque petróleo;
- Alcatrão = alcatrão e derivados.

⁴ O carvão metalúrgico nacional não foi alocado na linha de carvão metalúrgico, pois no BEN não há consumo final de carvão metalúrgico – o mesmo é utilizado apenas para a transformação em coquearias. Desta forma, este carvão informado não é classificado no BEN como carvão metalúrgico, e sim carvão vapor.

Rota 1: Integradas com Coque Próprio						
Energético (Consumo)	Sinterização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Gás Natural	0,045	0,100	0,027	0,490		0,661
Carvão	0,449	2,693				3,142
Carvão Metalúrgico						0,000
Lenha						0,000
Produtos da Cana						0,000
Outras Fontes Primárias	0,009	1,652	0,160	0,206	0,770	2,798
Óleo Diesel						0,000
Óleo Combustível				0,001		0,001
Gasolina						0,000
GLP						0,000
Querosene						0,000
Gases de Processo	0,039	0,294	0,007	0,482	0,029	0,851
Coque de Carvão Mineral	1,226	7,796				9,022
Elettricidade	0,552	0,342	0,134	1,110		2,139
Carvão vegetal						0,000
Álcool Etílico						0,000
Outras Fontes Secundárias de Petróleo						0,000
Alcatrão						0,000
Consumo final	2,320	12,877	0,329	2,289	0,799	18,614

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 42: Consumo final de energia para produção de aço na Rota 1, em GJ/t de aço bruto, após nomenclatura adequada para o BEU

Em resumo, após o tratamento de dados nota-se que 11,49% do consumo final é de energia elétrica e 88,51% é de energia térmica para Rota 1.

Na análise dessa rota, observa-se que o principal energético térmico utilizado para consumo final é o coque de carvão mineral, seguido do carvão e do gás de alto-forno, utilizados principalmente no alto-forno. Já a energia elétrica é consumida principalmente na etapa de laminação.

5.c1.i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais consumidores de energia elétrica são os motores que acionam os seguintes equipamentos:

- Grandes ventiladores (exaustão);

- Sopradores das ventaneiras e regeneradores (alto-forno);
- Sistemas de geração de energia (cogeração);
- *Shredder*;
- Laminadores;
- Sistemas de tratamento e bombeamento de água;
- Sistemas de despoeiramento (primário e secundário);
- Bombas de caldeira;
- Gaseificação e compressores.

Já os principais equipamentos consumidores de energia térmica são:

- Fornos de aquecimento de laminação;
- Fornos de ignição a sinterização;
- Regeneradores nos altos-fornos;
- Sistemas de aquecimento das células na coqueria;
- Sistemas de aquecimento de panela na aciaria;
- Sistemas de aquecimento de distribuidor no lingotamento contínuo;
- Tratamento térmico na parte de revestimentos;
- Fornos de cal;
- Caldeiras em geral;
- Processo de galvanização;
- Altos-fornos (coque e carvão vegetal);
- Sistemas de geração de energia (cogeração).

Para melhor entendimento da distribuição do consumo energético, na Tabela 43 é classificado o consumo final das principais etapas produtivas por serviço energético.

Rota 1: Integradas com Coque Próprio							
Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Illum	Eletr	Outros
Sinterização							
Alto-forno							
Aciaria							
Laminação							
Flare							

Legenda: FM: Força motriz; CP: Calor de processo; AD: Aquecimento direto; Refr: Refrigeração; Illum: Iluminação; Eletr: Eletroquímica; Outros: Outros usos finais.

Fonte: Elaboração própria com base em dados de campo
Tabela 43: Distribuição por serviço energético na Rota 1

5.c1.i.4) Indicadores energéticos

Consumo Específico

Considerando o tratamento de dados do item i.2 dessa seção, o consumo específico final é de 18,614 GJ/ton de aço bruto, conforme a Tabela 42.

Rendimentos Energéticos

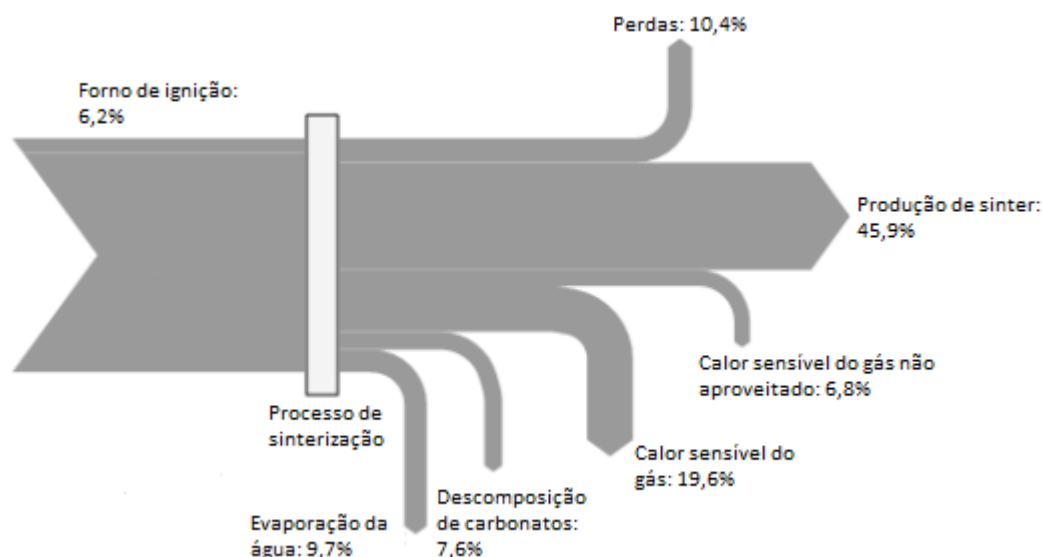
Os rendimentos atuais por serviço energético foram obtidos com base em estudos de caso. O rendimento é calculado a partir do balanço de energia de cada processo com base na energia de entrada e no somatório das perdas conforme equação a seguir:

$$\text{Rendimento}(\%) = [\text{Energia entrada} - \sum \text{perdas}] / \text{Energia entrada}$$

Nas Rota 1 e 2 o consumo final de energia térmica é utilizado 100% no aquecimento direto. A seguir serão apresentados os rendimentos atuais obtidos por etapa do processo para aquecimento direto.

Sinterização:

O primeiro rendimento considerado foi do forno de sinterização. A Figura 26 e a Tabela 44 ilustram o balanço energético conforme estudo de caso.



Fonte: SAIZ, J. (2012)

Figura 26: Balanço energético do processo de sinterização

Item	Exotérmico		Endotérmico	
	(Mcal/h)	%	(Mcal/h)	%
Calor de combustão de gás	95301	93,8%	-	-
Forno de Ignição	6299	6,2%	-	-
Evaporação de água	-	-	9855	9,7%
Decomposição de carbonatos	-	-	7722	7,6%
Calor sensível do gás	-	-	19914	19,6%
Calor sensível do gás não aproveitado	-	-	6909	6,8%
Produção de sinter	-	-	46634	45,9%
Perdas	-	-	10566	10,4%
Total	101600	100,0%	101600	100,0%

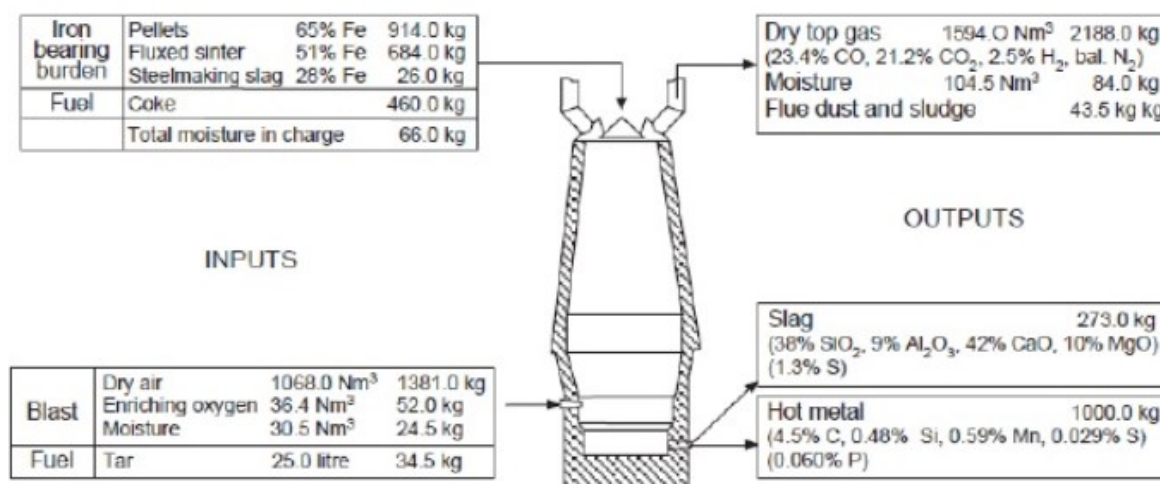
Fonte: SAIZ, J. (2012)

Tabela 44: Balanço energético do processo de sinterização, em Mcal/h

O rendimento obtido foi de 45,90%, adotando que energia útil do sistema foi de 46.634 Mcal/h, que corresponde a produção de sinter.

Alto-forno

O rendimento do alto-forno foi estimado conforme a Figura 27 e a Tabela 45.



Fonte: Alto Horno Balance de Masa y Energetico (s.d.)

Figura 27: Balanço energético do processo do alto-forno, em GJ/t

Energia de entrada (GJ/t de gusa)	Energia de saída (GJ/t de gusa)							Energia aproveitada (GJ/t de gusa)	Rendimento atual (GJ/t de gusa)
	Redução de óxidos de ferro	Redução de metaloides	Calor sensível da escória	Calor sensível do metal	Calor sensível do gás de topo	Calor sensível da vaporização da carga	Perda de calor no alto-forno		
3,75	1,17	0,15	0,48	1,36	0,20	0,13	0,26	2,81	74,93%

Fonte: Alto Horno Balance de Masa y Energetico (s.d.)

Tabela 45: Balanço energético do processo do alto-forno

O rendimento obtido foi de 74,93%, considerando que esse processo ainda não possui recuperação dos gases de topo e que a energia útil é referente à redução de óxidos de ferro, redução de metaloides e calor sensível do metal e da vaporização da carga.

Aciaria

O rendimento da aciaria foi obtido a partir do balanço de energia de um conversor de Lingotamento Direto (LD), apresentado na Tabela 46:

Item	Entradas de calor		Saída de calor	
	Kcal/t de aço	%	Kcal/t de aço	%
Calor contido no gusa líquido	231.593,72	45,0	-	-
Calor das reações exotérmicas	283.406,59	55,0	-	-
Calor contido no aço	-	-	336.199,58	65,3
Calor contido na escória	-	-	79.250,27	15,4
Calor contido nos gases	-	-	44.206,68	8,6
Perdas térmicas	-	-	55.343,78	10,7
Total	515.000,31	100,0	515.000,31	100,0

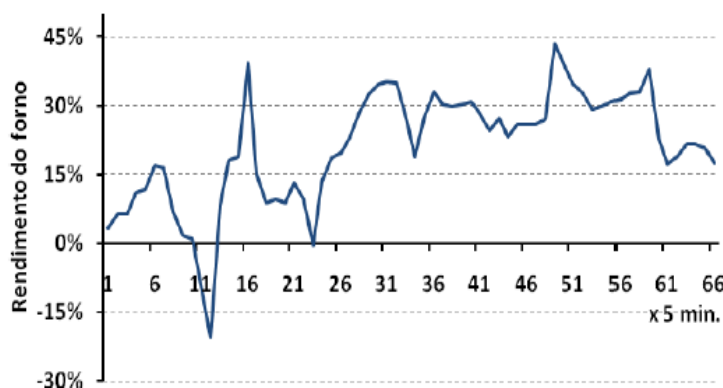
Fonte: JUNIOR, F. G. T., MELO, W. A. de, (s.d.)

Tabela 46: Balanço térmico do conversor LD

O rendimento obtido foi de 73,86%, considerando o calor contido no aço e nos gases, que serão recuperados para o aquecimento dos gases de alto-forno.

Laminação

O rendimento da etapa de laminação foi obtido a partir de estudo de Gonçalves (2011), que utilizou um modelo de simulação em tempo real de um forno de reaquecimento de tarugos para laminação para obter uma curva de rendimento (Gráfico 9).



Fonte: GONÇALVES, E. S. S. (2011)

Gráfico 9: Variação do rendimento do forno de reaquecimento de tarugos para laminação

Conforme observado no gráfico, o rendimento se estabiliza em 30% a partir de $t=26 \times 5\text{min}$, quando o gás natural passa a alimentar o sistema em conjunto com o gás de alto forno.

Consolidação das etapas:

Para estabelecimento do rendimento médio por fonte e serviço energético foi considerado que os energéticos que participavam da mesma etapa de produção teriam o mesmo rendimento. Já quando o mesmo energético participa de mais de uma etapa de produção, o rendimento resultante é calculado através de uma média dos rendimentos por etapa, ponderados pela energia consumida em cada uma delas.

O rendimento para eletricidade no serviço força motriz foi obtido através da média dos motores em diferentes tipos de potência de acordo com o modelo da Weg e para o serviço de iluminação foi utilizado o valor correspondente ao rendimento da lâmpada com tecnologia LED, conforme divulgado pela referência HTL (s.d).

Conforme a metodologia adotada, as etapas foram alocadas dentro de cada serviço energético conforme item i.2, resultando na Tabela 47:

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	39,6	-	-	-	-
Carvão	-	-	70,8	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	50,8	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	30,0	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	45,6	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	71,0	-	-	-	-
Elettricidade	95,5	-	-	-	85,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base nas referências de rendimento das etapas produtivas
Tabela 47: Rendimento energético por serviço energético da Rota 1, em %

Coeficientes de destinação

Para estabelecer os coeficientes de destinação, foram calculadas as porcentagens de energia a cada uso final (Tabela 48). Todo consumo final térmico nas Rotas 1 e 2 é utilizado para aquecimento direto.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Coque de Carvão Mineral	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Elettricidade	99,5	-	-	-	0,5	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base na metodologia do BEU

Tabela 48: Coeficiente de destinação por serviço energético da Rota 1, em %

5.c1.ii. Condições com tecnologias mais eficientes

5.c1.ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

Como comentado anteriormente, as usinas integradas utilizam o carvão mineral e o coque, tanto como o principal agente redutor quanto combustível na fabricação de ferro-gusa. Este é posteriormente refinado a fim de reduzir o teor de carbono na etapa de aciaria e, dessa forma, é transformado em aço. Portanto, o maior consumo final energético dessas unidades são o carvão mineral e o coque.

As maiores economias de energia neste subsegmento são encontradas na redução de consumo de carvão/coque e no aproveitamento energético dos gases gerados pelos processos de redução e fusão. Mais recentemente, tecnologias que aproveitam a energia calorífica residual dos processos siderúrgicos podem ser contabilizadas como sendo de aumento da eficiência energética dos processos (IABr, 2018).

O IABr definiu critérios sobre a aplicabilidade das medidas (Tabela 49) e classificou cada medida (Tabela 50), conforme apresentado a seguir.

Siglas	Crítérios de aceitação
SL	Variáveis específicas locais afetam custos e/ou a aplicabilidade da tecnologia
PO	Tecnologia melhora a eficiência energética/redução de GEE, mas altera e/ou acrescenta a emissão de outros poluentes
TA	Tecnologia já largamente utilizada e com boa penetração
PN	Tecnologia somente aplicável a novas unidades / plantas novas
PI	Tecnologia, cujo processo é imaturo, ou seja, depende de maior pesquisa e maior abrangência de aplicação. Ou ainda não possui referências suficientes que possam atestar sua viabilidade
TE	Tecnologia consolidada e muito especializada, ou seja, apenas aplicável a situações bastante restritas ou depende fortemente de fatores externos, como preços de insumos
LP	Longo Prazo - Tecnologias que apresentam um grau de maturidade elevado, mas são inviáveis, pois possuem um retorno de capital muito longo, sendo muitas vezes inviabilizadas pelo custo de capital e retorno do investimento em relação ao cenário de crescimento projetado

Fonte: IABr (2018)

Tabela 49: Critérios de aplicabilidade das medidas

Para a etapa produtiva de Coqueria, foram identificadas as seguintes medidas:

Medidas aplicáveis à Coqueria	Crítério
Controle de umidade do carvão	PI / LP
Apagamento a Seco do Coque (CDQ)	SL / LP
Fornos de Recuperação de Calor (Heat Recovery Coke Oven)	PN
Controle de perdas e pressão interna do forno	PN / SL
Recuperação de Gás de Coqueria (COG)	TA / SL
Sistemas para controle de temperatura do processo	SL
Inversores de frequência nos compressores de COG	TA / SL
Uso de sistemas para controle de mistura de carvão	SL

Fontes: IABr (2018) e BNDES (2012)

Tabela 50: Medidas de eficiência energética para a etapa produtiva de coqueria

Controle da umidade do carvão

O controle da umidade do carvão visa reduzir a quantidade de calor de carbonização e melhora a produtividade e a qualidade do coque através da redução da umidade de uma faixa normal de 8-10% para 6%, sem prejudicar a operação. Este controle é de suma importância devido a relação direta da umidade com a temperatura dos gases do topo do alto-forno, assim como a energia térmica necessária para promover a evaporação desta água. Em geral, o vapor de processo é utilizado como fonte para controle da umidade, sendo, porém, em alguns casos, o calor sensível do COG utilizado em seu lugar (JESUS, H. S., 2016).

Apagamento a seco do coque, CDQ (*Coke Dry Quenching*)

No final do processo de coqueificação, sabe-se que o coque quente é encaminhado para fora do forno. Sendo assim, utiliza-se o processo CDQ, que consiste no resfriamento do coque por circulação de um gás inerte (por exemplo, nitrogênio) em uma câmara, geralmente denominada de câmara de resfriamento, onde o coque quente entra pela parte superior e o gás inerte entra em contra corrente pela parte inferior. Em seguida, o gás utilizado sai com a energia recuperada do coque quente, podendo ser utilizado para produzir vapor de alta pressão para o processo em questão, geração de eletricidade ou para outros fins. Por fim, após ser passado para geração de vapor de alta pressão, o ar inerte resfriado é recirculado para a câmara (JCOAL, 2018).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,3 GJ/t de coque, com custo bastante elevado de US\$ 110/ton de coque, e *pay back* em longo prazo podendo ser maior do que 30 anos (BNDES, 2012).

Fornos de recuperação de calor (*Heat Recovery Coke Oven*)

Nesta tecnologia, os subprodutos liberados do processo de coqueificação são queimados dentro do forno, oferecendo um potencial de recuperação de calor e cogeração de energia elétrica. À medida que os fornos operam com pressão reduzida e a uma temperatura na qual todos os potenciais poluentes decompõem-se em compostos inflamáveis, esta técnica consome todos os subprodutos, eliminando a maior parte do potencial de poluição do ar e da água. O processo exige, assim, um design diferente dos fornos utilizados tradicionalmente, exigindo uma área maior. Nessa tecnologia, não é necessária uma planta para tratamento do COG e da água residual.

Quando o gás residual sai para uma caldeira de recuperação de calor, a qual converte o excesso de calor em vapor para geração de energia, o processo é chamado de “Coqueria *Heat Recovery*” (Coqueria com recuperação de calor). A Coqueria *Heat Recovery* tem uma produção menor de coque em comparação com uma planta convencional, mas fornece mais flexibilidade para seleção de carvão (WORRELL, E. 2008).

Controle de perdas e pressão interna do forno

Além de melhorar a distribuição de temperatura e evitar a entrada de ar frio nas câmaras de combustão, sendo um requisito necessário para o desempenho satisfatório do forno, o controle adequado da pressão interna do forno é um importante fator de segurança para o sistema, já que trabalha a uma pressão superior à pressão atmosférica. Dessa maneira, evitar a entrada de ar frio dentro do forno, portanto, evita riscos de explosão e incêndio (SARTORI, S. C., SARTORI, J. C., s.d.).

Recuperação de gás de coqueria (COG)

No processo de transformação do carvão mineral, na bateria de fornos, em coque, na coqueria, é produzido o gás COG (gás de coqueria). Sabe-se que é produzido aproximadamente 283,16 m³ de COG por tonelada de carga de carvão. Este gás pode ser

utilizado na própria unidade para queima do carvão mineral, além de poder ser misturado ao gás BFG (gás de alto-forno). Caso haja COG excedente, este pode ser destinado a geração de energia e tratado para ser utilizado em diversos setores da siderurgia, como na calcinação, na aciaria, no lingotamento contínuo, entre outros (RODRIGUES, P. E., LOBÃO, D., PONTES, J. R., CARDOSO, P. A., 2003).

Sistemas para controle de temperatura do processo

Ao invés do aquecimento constante convencional dos fornos de coque, o aquecimento programado mediante o uso de sistemas computadorizados para controle de temperatura nas coquearias, permite otimizar o fornecimento de gás combustível aos fornos nos vários estágios de coqueificação. Dessa forma, o aquecimento programado admite apenas a quantidade necessária tanto de ar como de gás combustível para o forno, de acordo com a temperatura do processo e da proporção de gases gerados dentro do forno, podendo gerar como consequência principal o benefício no aumento da velocidade de coqueificação (JUNQUEIRA, Y. S., HENRIQUE, N. I., COELO, R. J., ANDRADE, L. A., e outros, 2016).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,3 GJ/ton de coque, com custo bastante elevado de US\$ 77/ton de coque, e *pay back* em longo prazo podendo ser maior do que 30 anos. (BNDES, 2012).

Inversores de frequência nos compressores de COG (Coke Oven Gas)

Como há a exigência de pressurização do gás de coqueria, devido a sua geração em baixas pressões, para a rede de gás interno, salienta-se as variações de fluxo ao longo do tempo do mesmo. Tais variações se devem às reações da produção de coque. Logo, inversores de frequência para acionamento de compressores de COG podem ser instalados para reduzir a energia de compressão e minimizar as variações de pressão da rede de gás.

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 1,2 GJ/ton de coque, com custo relativamente baixo de US\$ 0,47/ton de coque, e *pay back* em longo prazo podendo ser maior do que 30 anos (BNDES, 2012).

Uso de sistemas para controle de mistura de carvão

A técnica de mistura de carvão visa a obtenção do coque de acordo com a composição desejada. O controle dessa mistura é importante pois alguns carvões produzem um coque aceitável sem necessidade de mistura, enquanto outros só são utilizados em misturas. Algumas empresas possuem o costume de se utilizar apenas um tipo de carvão, enquanto outras são adeptas a mistura. Há diversos fatores que influenciam no uso da mistura, como as características físico-químicas e a acessibilidade do carvão sob o ponto de vista econômico. Além disso, o controle de mistura de carvão permite evitar que não haja a produção de muita matéria volátil, pois visa o uso de baixos teores de enxofre e cinzas no carvão, o que diminui a produção de subprodutos não desejados no processo (WOOD, R., 2018).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,3 GJ/ton de coque, com custo bastante elevado de US\$ 77/ton de coque, e *pay back* em curto prazo de 2,8 anos. (BNDES, 2012).

Sinterização	Critério
Recuperação de calor residual	PI / SL
Redução dos vazamentos de ar	TA / SL
Aumento da profundidade do leito	TA / SL
Uso de resíduos combustíveis	TA / PO
Melhoria dos processos de automação e controle dos processos	TA / PO

Fonte: IABr (2018) e BNDES (2012)

Tabela 51: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de sinterização

Recuperação de calor do gás residual na sinterização

Geralmente dois sistemas podem ser utilizados para recuperar a energia do processo de sinterização. No primeiro deles, o gás de escape da grelha de sinterização pode ser retornado para a grelha de sinterização como o ar de combustão. Este sistema pode ser aplicado para diminuir o consumo de energia, visto que reduz o consumo de combustível sólido. No segundo, a energia do sínter quente é recuperada no final do leito de sinterização, utilizando um sistema de resfriamento do sínter, de forma que o ar quente possa ser aplicado para gerar vapor (JRC, 2012).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,55 GJ/ton de sínter, com custo de US\$ 4,7/ton de sínter, e *pay back* em curto prazo de 2,8 anos (BNDES, 2012).

Redução de vazamento de ar

Redução de vazamento de ar pode reduzir o consumo de eletricidade nos exaustores em aproximadamente 11-14 MJ /t de sínter e pode ter um efeito positivo sobre o equipamento de recuperação de calor. Entretanto, esta ação necessita de pequenos investimentos para o reparo do equipamento existente. Além disso, sabe-se que a redução de vazamento de

ar permite a elevação de produtividade da sinterização, a redução do custo do síter e consequentemente a redução do consumo de combustível (BICALHO, R. M., MIRANDA, E. S., SOUZA, C. C., FORTES, e outros, 2008).

Aumento da profundidade do leito

Sabe-se que a carga do alto-forno exige uma uniformidade, isenção de finos, faixa granulométrica estreita e suficiente resistência mecânica para assegurar boa permeabilidade. Para atender estes requisitos, é necessária uma profundidade ótima do leito com o intuito de obter um síter de boa granulometria, garantindo boa eficiência nas etapas posteriores do processo. Dessa forma, estabelecer uma altura mínima da profundidade do leito através de testes que permitam bons resultados para o síter é de suma importância para garantir um processo satisfatório. Entretanto, deve-se realizar um estudo de viabilidade econômica, visto que o aumento da profundidade do leito pode ser alto (NEVES, A. S., DANIEL, B. T., SILVA, R. N., s.d.).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,09 GJ/ton de síter, com custo relativamente baixo de US\$ 0,01/ton de síter, e *pay back* em curto prazo de 0,1 ano (BNDES, 2012).

Uso de resíduos combustíveis

A geração de resíduos geralmente é associada à ineficiência do processo devido à perda de material e energia. Alguns resíduos gerados, principalmente os sólidos, são destinados aos aterros após sua produção. Dessa forma, busca-se sempre evitar a geração de resíduos e se possível, utilizá-los como combustíveis no processo. De acordo com a literatura, diversas tecnologias economicamente viáveis permitem a aplicação de coprodutos como matéria-prima ou fonte de energia no processo. Logo, há quatro grandes grupos de resíduos sólidos que podem ser reaproveitados: recicláveis contendo ferro, os finos de coque, as escórias e a sucata. Destes, pode-se enfatizar os pós de alto-forno e coqueria, onde é possível utilizá-los como combustível na sinterização, pois são ricos em carbono. Além disso, há a formação de lama na remoção de pó do gás, que também pode ser encaminhado para a sinterização. A formação de carepas, também pode ser utilizada na sinterização, favorecendo a redução do coque. Sendo assim, há diversos materiais que podem ser reaproveitados, reduzindo o custo de combustíveis no processo e evitando a geração de resíduos. Além disso, alguns resíduos podem ser utilizados para outros fins, como por exemplo o uso da escória para aplicação de pavimento rodoviário (CARDOSO, C. G., 2016).

Melhoria dos processos de automação e controle dos processos

Visando evitar o descarte de materiais que não atendem as especificações exigidas, como por exemplo a granulometria, além de geração de outras perdas no processo, o uso de controle de processos e automação na sinterização pode ser utilizado. Logo, dependendo de como a sinterização se dá, deve-se buscar as principais variáveis que afetam o processo para evitar possíveis problemas. Sabe-se, de modo geral, que o nível de matéria-prima nos silos e sua vazão mássica devem ser controladas, visto que pode-se estar utilizando quantidade de matéria-prima maior que o necessário ou menor que o suficiente para o

processo. Outras variáveis importantes de serem medidas e controladas são a vazão de combustível, a temperatura de sinterização, dentre outros. Além de evitar possíveis perdas de materiais no processo, o uso da automação e controle do processo permite mitigar possíveis acidentes, preservando assim a saúde e segurança ocupacional (KB ELIPSE, 2018).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,05 GJ/ton de síter, com custo relativamente baixo de US\$ 0,21/ton de síter, e *pay back* em curto prazo de 1,4 ano (BNDES, 2012).

Alto-forno	Critério
Turbina de topo (TRT)	TA / LP / SL
Aumento da injeção de carvão pulverizado (PCI)	TA / SL
Aumento da Injeção de gás natural (GN)	TA / TE / SL
Recuperação do gás de Alto-Forno (BFG)	TA / SL
Injeção de gás de origem renovável de aterros sanitários (GNR)	TE / PN / SL
Recuperação de calor dos regeneradores	PI / SL / LP
Automação do processo de preaquecimento do ar de injeção	TA / PO
Melhoria dos sistemas de automação e controle	TA / PO

Fonte: IABr (2018) e BNDES (2012)

Tabela 52: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de alto-forno

Turbina de topo (TRT)

Como em grandes altos-fornos se tem a pressão de topo alta, é possível aproveitá-la e recuperar os gases, permitindo economia considerável de energia, além de contribuir substancialmente na redução de emissões de CO₂. O equipamento utilizado para este fim é o TRT, que consiste numa turbina de topo instalada junto ao alto-forno onde se faz o controle da pressão e ao mesmo tempo gera energia elétrica através do acionamento da turbina pelo gás gerado. Além da geração de energia, esta tecnologia possui a vantagem de não exigir tecnologia sofisticada para operação e manutenção, exigindo, entretanto, pouca demanda de água e outras utilidades (JASE W., 2018).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia elétrica de 0,11 GJ/ton de gusa, com custo bastante elevado de US\$ 32/ton de gusa, e *pay back* com prazo muito longo, podendo ultrapassar 30 anos (BNDES, 2012).

Aumento de injeção de carvão pulverizado (PCI) até 225 kg/t

O principal benefício da injeção de carvão em um alto-forno é a redução do consumo de coque e consecutivamente do custo desse insumo, o qual é substancialmente mais elevado do que o custo do carvão. No alto-forno, o aumento da injeção de PCI pode representar redução na produção de coque, resultando na diminuição de uma grande quantidade de energia consumida nesse processo. Além disso, o mercado de carvão pulverizado é mais estável e com preços mais favoráveis em relação a outros combustíveis. O aumento do PCI também propicia queda dos custos operacionais no processo de redução no alto-forno e aumento da vida útil das baterias de coque, já que há menor demanda do mesmo (FERNANDES, M. V., 2007).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,57 GJ/ton de gusa, com custo de US\$ 8/ton de gusa, e *pay back* com curto prazo de 2,4 anos (BNDES, 2012).

Aumento de injeção de Gás Natural (GN) até 140 kg/t

Assim como a injeção de carvão pulverizado, a injeção de gás natural permite uma redução do consumo de coque com benefícios associados. Esta tecnologia requer pouco investimento adicional em equipamentos especiais, com exceção do distribuidor e equalizador de pressão do gás, e permite diminuir consideravelmente o consumo de coque. No entanto, os preços do gás natural podem limitar a atratividade econômica. As taxas de substituição do gás natural variam entre 0,9 e 1,15 tonelada de gás natural por tonelada de coque (WORRELL, E., 2010).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,90 GJ/ton de gusa, com custo de US\$ 7,8/ton de gusa, e *pay back* com curto prazo de 1,5 ano (BNDES, 2012).

Recuperação do gás de alto-forno (BFG)

A geração de gás de alto-forno se dá na redução do sínter e coque com injeção de carvão para a produção de gusa. Logo, o gás de alto-forno pode ser utilizado no pré-aquecimento de ar nos regeneradores no próprio alto-forno, além de poder ser utilizado na geração de energia (RODRIGUES, P. E., LOBÃO, D., PONTES, J. R., CARDOSO, P. A., 2003).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,07 GJ/ton de gusa, com custo relativamente baixo de US\$ 0,47/ton de gusa, e *pay back* com curto prazo de 0,8 ano (BNDES, 2012).

Injeção de gás de origem renovável de aterros sanitários (GNR)

Visto que no alto-forno geralmente se utiliza o gás natural como combustível, que tem como principal componente o metano, é possível aproveitar o gás de origem renovável de aterros sanitários como combustível. Sabe-se que a geração de biogás de aterros sanitários é proveniente de resíduos sólidos dispostos no solo, que gera uma mistura de gases que possuem majoritariamente metano em sua composição. Logo, visando objetivar o aproveitamento energético do biogás produzido pela degradação de resíduos sólidos, é possível utilizá-lo como combustível em altos-fornos, diminuindo assim os custos associados a compra de combustível convencional (MMA, 2018).

Recuperação de calor dos regeneradores

Um sistema de recuperação de calor do gás de exaustão (*Waste Gas Heat Recovery System* - WGHRS) melhora a eficiência térmica dos regeneradores do alto-forno com o calor dos gases residuais parcialmente recuperados pela instalação de trocadores de calor externo. O calor recuperado é tipicamente utilizado para pré-aquecer o gás de alto-forno e/ou ar de combustão. A principal vantagem do pré-aquecimento do gás de alto-forno e do ar de combustão é o fato de possibilitar a redução ou a eliminação do consumo de gás de enriquecimento (gás natural ou gás de coqueria). Além deste sistema, há um sistema denominado *Heat Pipe*, que consiste em um equipamento que visa a transferência de calor entre um fluido quente e um frio através da evaporação e condensação isotérmica de um fluido confinado no interior de um feixe de tubos. Esta tecnologia agrega as mesmas vantagens frente à utilização dos trocadores convencionais, possuindo o benefício de ter um design compacto, alta vedação e transferência de calor mais uniforme em toda a área de troca térmica (BARROS, J. L. M., PATTO, R. P., GANDRA, P. V. S., 2015).

Automação do processo de pré-aquecimento do ar de injeção

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,37 GJ/t de gusa, com custo relativamente baixo de US\$ 0,47/t de gusa, e pay back com curto prazo de 0,4 ano (BNDES, 2012).

Melhoria dos sistemas de automação e controle

Geralmente um equipamento ou processo é constituído por um sistema de automação e controle. Entretanto, pouco se avalia quando um sistema de automação já está ultrapassado em relação às novas tecnologias existentes. Dessa maneira, modernizar o sistema de automação e controle é importante para visar a mitigação de falhas e permitir que o produto de interesse seja produzido conforme o especificado. Além disso, um sistema de automação e controle robusto, oferece suporte aos operadores, indicando através da geração de relatórios e indicadores a performance da produção, evitando assim, possíveis perdas materiais e de energia no processo (PAUL WURTH, 2018).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,4 GJ/ton de gusa, com custo relativamente baixo de US\$ 0,56/ton de gusa, e *pay back* com curto prazo de 0,4 ano (BNDES, 2012).

Aciaria	Critério
Recuperação de calor sensível do gás de aciaria (LDG)	PI / LP
<i>Drivers</i> de velocidade variável	LP / SL
Recuperação do LDG	TA / SL
Uso de sucata na carga fria	TA / SL

Fonte: IABr (2018) e BNDES (2012)

Tabela 53: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de aciaria

Recuperação de calor sensível do gás de aciaria (LDG)

Dois sistemas podem ser utilizados para recuperar a energia do gás. No primeiro, o gás é queimado no duto de gases do convertedor e o calor sensível é recuperado numa caldeira de recuperação. No segundo sistema, o gás (LDG) é limpo, resfriado e armazenado em um gasômetro para utilização nos diversos fornos dos processos produtivos ou para gerar vapor em caldeiras na planta de cogeração (JRC, 2012).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,55 GJ/ton de aço bruto, com custo bastante elevado de US\$ 34,4/ton de aço bruto, e *pay back* de longo prazo de 12 anos (BNDES, 2012).

Drivers de velocidade variável

Em uma aciaria LD, grandes ventiladores são utilizados para controlar a qualidade do ar. O processo é descontínuo e, como consequência, os volumes de gases de exaustão variam muito ao longo do tempo. Esta característica do processo permite que a instalação de um inversor de frequência possa ser uma opção viável. As reduções do consumo de energia elétrica podem chegar a ordem de 30 a 50% (WORRELL, E., 2010).

A aplicação de ventiladores com velocidade variável controlada pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,03 GJ/ton de aço bruto, com custo relativamente baixo de US\$ 0,31/ton de aço bruto, e *pay back* em médio prazo de 8 anos (BNDES, 2012).

Recuperação do LDG

Assim como outros gases produzidos em processos industriais siderúrgicos, o LDG pode ser recuperado e reaproveitado tendo conhecimento de sua composição para ser usado de forma segura e otimizado. Logo, é possível utilizar este gás na geração de energia e vapor (CARVALHO, P. S., MESQUITA, P. P., ARAÚJO, E. D., 2018).

Uso de sucata na carga fria

A sucata pode ser encontrada no interior da própria siderúrgica como pontas de lingotes, placas ou chapas e tarugos. Esta sucata pode ser retornada à aciaria como matéria-prima,

minimizando o consumo de recursos e alterando o destino de um agente impactante no ambiente, reduzindo assim, a geração de resíduos (CARDOSO, C. G., 2016).

Laminação	
Controle de processo nos laminadores de tiras a quente (LTQ)	SL
Queimadores mais eficientes com sistemas de regeneração e recuperação de gases	LP
Controle de oxigênio do sistema de ventilação de ar de combustão com uso de VSD	TA
Recuperação de calor da água de resfriamento do LTQ para geração de vapor	SL
Recuperação de calor de fornos das linhas de tratamento térmico	SL
Sistemas de monitoramento automático e de metas em laminadores a frio	SL
Lingotamento <i>Near Net Shape</i>	TE / LP

Fonte: IABr (2018)

Tabela 54: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de laminação

Controle de processo nos laminadores de tiras a quente (LTQ)

Um controle de processo nos laminadores de tiras a quente tem por objetivo, otimização da qualidade da tira no que diz respeito ao comprimento, superfície, achatamento fora da tolerância; Otimização da produção através do aumento da taxa de alimentação, aceleração máxima e velocidade; Garantir que todos os valores pré-determinados permaneçam dentro dos limites configurados para o material e o laminador; Evitar desbastamento das fitas, marcas produzidas pelos cilindros laminadores e paradas de alimentação; E configuração de condições estáveis de laminação (INGETEM, 2018).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,3 GJ/ton de aço bruto, com custo relativamente baixo de US\$ 1,1/ton de aço bruto, e *pay back* em curto prazo de 1,2 ano (BNDES, 2012).

Queimadores mais eficientes com sistemas de regeneração e recuperação de gases

Visando um sistema de regeneração e recuperação de gases, criaram-se os queimadores regenerativos, que consistem em dois queimadores onde um atua como queimador e outro atua como recuperador, operando assim de maneira alternada. A recuperação ocorre com a extração dos gases resultantes da combustão passando através do corpo de um dos queimadores, onde há um revestimento feito de material refratário. O revestimento é responsável por recuperar e armazenar calor sensível proveniente dos gases queimados. Portanto, quando o aquecimento estiver sido alcançado pelo revestimento refratário, o regenerador de gases passa a atuar como queimador, enquanto o outro queimador passa a operar como recuperador. Sendo assim, há o reaproveitamento dos gases nos queimadores (GORN, A. A., 1996).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia elétrica de 0,7 GJ/ton de aço bruto, com custo relativamente baixo de US\$ 3,9/ton de aço bruto, e *pay back* em curto prazo de 1,8 ano (BNDES, 2012).

Controle de oxigênio do sistema de ventilação de ar de combustão com uso de VSD

Como a vazão de oxigênio é uma variável de extrema importância para o processo em questão, seu controle visa estabelecer quantidade necessária de oxigênio para promover a combustão. Dessa forma, o controle pode ser utilizado através da tecnologia VSD (*Variable Speed Drive*), que é uma tecnologia que propicia a velocidade variável por frequência controlada. Comparada a tecnologia convencional, de velocidade fixa, a nova tecnologia atinge performance e resultados melhores, diminuindo o consumo de energia utilizado e geração de ruídos (RUBIM, C., 2013).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,33 GJ/ton de aço bruto, com custo relativamente baixo de US\$ 0,79/ton de aço bruto, e *pay back* em médio prazo de 0,8 ano (BNDES, 2012).

Recuperação de calor da água de resfriamento do LTQ para geração de vapor

O setor siderúrgico é caracterizado por perdas consideráveis de água por evaporação em seus processos, sendo um desses o de laminação a quente. A perda por evaporação neste processo, junto com a perda associada ao resfriamento da água após a laminação em torres de resfriamento, é compensado com a reposição de água no sistema para ser recirculado. Dessa forma, muitas empresas visam reaproveitar a água evaporada na laminação para geração de vapor, podendo ser utilizada como uma corrente quente em outra etapa, reduzindo assim custos associados a utilidades (SILVA, L., 2017).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,03 GJ/ton de aço bruto, com custo relativamente baixo de US\$ 1,3/ton de aço bruto (BNDES, 2012).

Recuperação de calor de fornos das linhas de tratamento térmico

Tratamento térmico consiste no aquecimento ou resfriamento controlado dos metais com objetivo de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, porém sem alterar a forma do produto final (GERDAU, s.d.). Segundo GORNI A. A., e outros (2013), são poucas as informações na literatura sobre a execução de balanços térmicos no caso de fornos para tratamento térmico, devido ao fato, de que a quantidade de energia envolvida nesses casos é muito inferior a outros fornos a montante do processo siderúrgico. Entretanto, a análise dessa etapa pode ocasionar uma excelente oportunidade do ponto de vista energético, identificando seus pontos fracos e até quantificando os ganhos decorrentes de sua eliminação.

Em resumo, um dos tratamentos térmicos comumente usados na indústria siderúrgica é o recozimento do aço, com objetivo de remover tensões devidas ao tratamento mecânico a frio ou a quente, diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço, alterar as propriedades mecânicas como resistência, ductilidade etc., modificar as características elétricas e magnéticas, entre outros. O recozimento em caixa, que é utilizado para proteção de uma grande quantidade de peças de aço, de modo a impedir a oxidação da superfície acabada, é realizado através do aquecimento lento até a temperatura adequada, na faixa de 590 a 660°C, em seguida a carga é mantida sob tais condições por um período de 3 a 5 horas e por fim é iniciado a etapa de resfriamento, basicamente sob o efeito de ventiladores, até a temperatura atingir 100 °C. Portanto, nesse sistema aparecem diferentes oportunidades de recuperação de energia, em destaque a recuperação do calor sensível dos fumos da combustão e o calor extraído pela água que refrigera a ventoinha (GORNI A. A., e outros, 2013; SPECTRU, s.d.).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia elétrica de 0,02 GJ/ton de aço bruto e elétrica térmica de 0,30 GJ/ton de aço bruto, com custo médio de US\$ 4,2/ton de aço bruto, e *pay back* em curto prazo de 4,0 anos (BNDES, 2012).

Sistemas de monitoramento automático e de metas em laminadores a frio

O objetivo da unidade de laminação a frio é reduzir a espessura das chapas laminadas a quente, fornecendo melhor qualidade superficial e características mecânicas que serão em seguida adequadas ao seu uso. Portanto, nesse processo, pode-se obter chapas com espessuras entre 0,20 a 2,99 mm e com uma superfície brilhante e uniforme. Para isto, é importante um conjunto de controle para especificação das peças, como o sistema de controle automático de espessura (AGC), que busca manter a espessura da chapa laminada a frio dentro dos padrões estabelecidos, através das funções que compõem a sistema; O sistema de controle aplainamento, para adequar o aplainamento dos produtos a valores inferiores a 20 U.I., valor de referência mundial; E medidores de espessura (Raio-X), para conferir a espessura da chapa laminada (UFPR, s.d.).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,21 GJ/ton de aço bruto, com custo relativamente baixo de US\$ 1,7/ton de aço bruto, e *pay back* em curto prazo de 0,8 ano (BNDES, 2012).

Lingotamento *Near Net Shape casting*

Nessa tecnologia, o metal lingotado é diretamente encaminhado ao laminador a quente, sem a necessidade das etapas de resfriamento seguido de reaquecimento para a laminação que ocorre no processo de lingotamento convencional (BNDES, 2012).

Essa tecnologia apresenta uso limitado a alguns formatos de produtos, como placas menos espessas e de laminados de tiras a quente. Entretanto, estima-se que a aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia elétrica de 0,64 GJ/ton de aço bruto e de energia térmica de 3,5 GJ/ton de aço bruto, porém o custo associado é bastante elevado em US\$ 235/ton de aço bruto, e *pay back* em curto prazo de 3,3 ano (BNDES, 2012).

Geral	
Melhorias de controle de processo	TA / SL
<i>Drivers</i> de velocidade variável nas utilidades	TA / LP
Aumento de eficiência em cogeração	PN / SL / LP
Redução de queima no <i>Flare</i>	TA / LP SL
Tecnologia de gestão/programa de eficiência energética	TA / TE

Fonte: IABr (2018)

Tabela 55: Medidas de eficiência energética gerais para o subsegmento de produção de aço via plantas integradas

Melhorias de controle de processo

A instalação de instrumentos de medição mais precisos e de um sistema de monitoramento e controle em tempo real do consumo dos energéticos podem reduzir o consumo de energia nos processos de produção de forma satisfatória. Para isso, existem vários equipamentos e

softwares de medição e controle disponíveis no mercado e, portanto, uma avaliação técnico-econômica deve ser realizada para a escolha do melhor sistema.

Drivers de velocidade variável nas utilidades

A instalação de *drivers* de velocidade variável nos motores, bombas e ventiladores das unidades de produção que não tem operação contínua, otimiza o consumo de energia elétrica de acordo com a demanda das células de produção.

Aumento de eficiência em cogeração

A eficiência média de conversão de energia térmica em centrais termelétricas de siderúrgicas é atualmente 32%. Esta eficiência média de transformação de energia está abaixo das melhores práticas e o objetivo desta iniciativa é substituir instalações mais antigas por novas tecnologias de caldeiras e de turbinas a vapor (WORRELL, E., 2010).

Redução de queima no *flare*

Sabe-se que o *flare* é um importante elemento de segurança em refinarias, planta de liquefação ou processos químicos em geral. Entretanto, uma medição não controlada da vazão a ser queimada pode gerar riscos ao sistema e gerar mais emissões de gases de efeito estufa para o meio ambiente. Portanto, um sistema de medição e controle de gás do *flare* é fundamental para otimizar a queima do gás, buscando a máxima redução de consumo de vapor, gás natural e gases combustíveis alinhados a linha de *flare* (GE COMPANY, 2018).

Tecnologia de gestão/programa de eficiência energética

A implementação do programa de eficiência energética requer o planejamento detalhado e a definição de metas de otimização e redução do consumo de energia por cada etapa do processo. Além disso, é necessário implementar um controle do processo eficiente e estruturar uma equipe para identificar, propor e detalhar os projetos, incluindo os estudos de viabilidade técnico-econômica. Uma boa opção é a certificação na Norma ISO-50001, que permite a revisão e melhoria de todos os processos de forma estruturada e documentada. Os resultados obtidos através de um programa de eficiência energética irão variar conforme o nível de atualização tecnológica das usinas e da maturidade em relação à conscientização sobre o consumo eficiente de energia.

5.c1.ii.2) Indicadores Energéticos

Consumo específico

Conforme a grande complexidade e inúmeras variáveis envolvidas na análise e avaliação da implementação de tecnologias alternativas, foi necessário fazer estimativas baseadas nas referências bibliográficas e consultas aos trabalhos técnicos, sobre redução do consumo dos energéticos e aumento da produtividade do setor. Nessas estimativas é preciso atentar-se que não foram considerados estudos de pré-viabilidade necessários para desenvolver cada uma dessas medidas.

Dessa forma, como foi demonstrado na descrição das medidas de eficiência energética no item anterior, a estimativa da redução do consumo dos principais energéticos refere-se a testes em equipamentos específicos e para esse estudo e esses testes serão generalizados para todo o subsegmento das indústrias integradas de aço.

É importante lembrar que foram utilizados dados teóricos da literatura, que no momento são os mais atualizados, mas no futuro podem ser modificados, e por isso vir a alterar o perfil de eficiência energética do segmento.

Desse modo, para o estabelecimento do consumo específico melhorado e do rendimento melhorado foram selecionadas as medidas aplicáveis a equipamentos, relacionadas a primeira transformação, conforme os conceitos de rendimento do BEU. A seguir será apresentada a estimativa do consumo específico de cada etapa do processo de produção de aço.

Sinterização

Na etapa de sinterização foram adotadas as medidas térmicas de: aumento da profundidade do leito e melhoria dos processos de automação e controle dos processos no serviço de aquecimento direto (Tabela 56).

Medidas aplicáveis à Sinterização	Economia elétrica	Economia térmica	Total
	(GJ/t de síter)		
Aumento da profundidade do leito	Desprezível	0,09	0,09
Melhoria dos processos de automação e controle dos processos	Desprezível	0,05	0,05
Total de economia considerada	0,003*	0,14	0,143

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base em BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 56: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1

Conforme as medidas apresentadas acima, a Tabela 57 apresenta o consumo específico atual, melhorado e o potencial de economia de energia para a etapa de sinterização.

Itens	Elétrico		Térmico		Total	
	GJ/t de síter	GJ/t de aço	GJ/t de síter	GJ/t de aço	GJ/t de síter	GJ/t de aço
CE atual	0,484	0,552	1,550	1,768	2,034	1,891
CE melhorado	0,481	0,548	1,410	1,601	1,891	2,157
Potencial	0,003	0,140	0,140	0,167	0,143	0,163
% melhoria	0,62%		9,03%		7,03%	

Fonte: Elaboração própria baseada nos dados do IABr e BNDES (2012)

Tabela 57: Consumo específico da etapa de sinterização da Rota 1

Alto-forno

Na etapa de alto-forno foram adotadas as seguintes medidas de eficiência energética: Aumento da injeção de carvão pulverizado (PCI), automação do processo de

preaquecimento do ar de injeção e melhoria dos sistemas de automação e controle no serviço de aquecimento direto e como melhoria elétrica a substituição de motores.

Medidas aplicáveis ao alto-Forno	Economia elétrica (GJ/t de gusa)	Economia térmica (GJ/t de gusa)
Aumento da injeção de carvão pulverizado (PCI)	Desprezível	0,57
Automatização do processo de preaquecimento do ar de injeção	Desprezível	0,37
Melhoria dos sistemas de automação e controle	Desprezível	0,4
Medidas consideradas	0,002*	1,34

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base em BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 58: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1

Conforme as medidas apresentadas acima, a Tabela 59 apresenta o consumo específico atual, melhorado e o potencial de economia de energia para a etapa de alto-forno.

Itens	Elétrico		Térmico		Total	
	GJ/t de gusa	GJ/t de aço	GJ/t de gusa	GJ/t de aço	GJ/t de sínter	GJ/t de aço
CE atual	0,334	0,342	12,253	12,535	12,587	12,877
CE melhorado	0,332	0,340	10,913	11,164	11,245	11,504
Potencial	0,002	0,002	1,340	1,371	1,342	1,373
% melhoria	0,62%		10,94%		10,66%	

Fonte: Elaboração própria baseada nos dados do IABr e BNDES (2012)

Tabela 59: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1

Aciaria

Na etapa de aciaria foram adotadas as medidas térmicas de adição de drivers de velocidade variável no serviço de aquecimento direto. E como melhoria elétrica a substituição de motores.

Medidas aplicáveis à aciaria	Economia elétrica (GJ/ton de aço bruto)	Economia térmica (GJ/ton de aço bruto)
Drivers de velocidade variável	Desprezível	0,03
Medidas consideradas	0,001*	0,03

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base em BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 60: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1

Conforme as medidas apresentadas acima, a Tabela 61 apresenta o consumo específico atual, melhorado e o potencial de economia de energia para a etapa de aciaria.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	0,134	0,194	0,329
CE melhorado	0,133	0,164	0,298
Potencial	0,001	0,030	0,031
% melhoria	0,62%	15,43%	9,38%

Fonte: Elaboração própria baseada nos dados do IABr e BNDES (2012)

Tabela 61: Consumo específico da etapa de aciaria da Rota 1

Laminação

Na etapa de laminação foram adotadas as medidas térmicas de controle de oxigênio do sistema de ventilação de ar de combustão com uso de VSD no serviço de aquecimento direto. E como melhoria elétrica a substituição de motores.

Medidas aplicáveis à laminação	Economia elétrica (GJ/ton de aço bruto)	Economia térmica (GJ/ton de aço bruto)
Controle de oxigênio do sistema de ventilação de ar de combustão com uso de VSD	Desprezível	0,33
Medidas consideradas	0,007*	0,33

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base em BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 62: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 1

Conforme as medidas apresentadas acima, a Tabela 63 apresenta o consumo específico atual, melhorado e o potencial de economia para a etapa de laminação.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	1,110	1,179	2,289
CE melhorado	0,103	0,849	1,952
Potencial	0,007	0,330	0,337
% melhoria	0,62%	27,99%	14,72%

Fonte: Elaboração própria baseada nos dados do IABr e BNDES (2012)

Tabela 63: Consumo específico da etapa de laminação da Rota 1

Consolidado

Considerando o tratamento de dados do item ii.2, o consumo específico final é de 16,710 GJ/ton de aço bruto.

Rendimentos energéticos

O rendimento melhorado por etapa foi calculado a partir do rendimento atual e aplicando o potencial de economia das medidas relacionadas à primeira transformação de energia, apresentado no item anterior (consumo específico). Foi utilizado o rendimento melhorado de cada etapa para todas as respectivas fontes térmicas. Por fim, o rendimento melhorado de cada fonte por serviço energético foi obtido ponderando-se o rendimento de cada etapa pelo consumo da fonte em cada etapa.

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	50,51	-	-	-	-
Carvão	-	-	79,32	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	57,93	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	41,66	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	55,70	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	79,56	-	-	-	-
Elettricidade	95,5	-	-	-	85,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base nas referências de rendimento das etapas produtivas

Tabela 64: Rendimento energético por serviço energético, em %

Coeficiente de destinação

Na Tabela 65 são apresentados os coeficientes de destinação da Rota 1 que faz referência às porcentagens que são destinadas a cada serviço energético para a situação com tecnologias mais eficientes.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Coque de Carvão Mineral	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Eletricidade	99,5	-	-	-	0,5	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 65: Coeficiente de destinação por serviço energético, em %

Investimentos necessários para implantação de medidas básicas de eficiência.

As tabelas a seguir apresentam as medidas mais aplicáveis e relacionadas a primeira transformação de energia (equipamentos) para o segmento de produção de aço via plantas integradas. Para cada medida são apresentados os custos para reposição do equipamento atual (quando aplicável), o custo do equipamento eficiente, o percentual de economia de energia e economia por energia de matéria-prima (aço bruto) consumido.

Na etapa de coqueria algumas opções são apresentadas na Tabela 66, segundo investimento e potencial de economia.

Equipamentos e medidas de melhoria aplicadas a coqueria	INVESTIMENTO (US\$/ton de coque)	ECONOMIA DE ENERGIA (GJ/ton de coque)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ton de coque)	Pay back (anos)
Apagamento a Seco do Coque (CDQ)	110,00	0,30	0,007	30,00
Sistemas para controle de temperatura do processo	77,00	0,30	0,007	30,00
Inversores de frequência nos compressores de COG	0,47	1,20	0,029	20,00
Uso de sistemas para controle de mistura de carvão	77,00	0,30	0,007	2,80

Fonte: BNDES (2012)

Tabela 66: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de coqueria

Já na etapa de sinterização algumas opções são apresentadas na Tabela 67, segundo investimento e potencial de economia.

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO (US\$/ton de síter)	ECONOMIA DE ENERGIA (GJ/ton de síter)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ton de síter)	Pay back (anos)
Recuperação de calor residual	4,70	0,55	0,013	2,8
Redução dos vazamentos de ar	0,14	0,01	0,000	1,3
Aumento da profundidade do leito	0,01	0,09	0,002	0,1
Uso de resíduos combustíveis	0,29	0,18	0,004	0,5
Melhoria dos processos de automação e controle dos processos	0,21	0,05	0,001	1,4

Fonte: BNDES (2012)

Tabela 67: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de sinterização

As opções indicadas no caso dos altos-fornos são apresentadas na Tabela 68

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO (US\$/ton de gusa)	ECONOMIA DE ENERGIA (GJ/ton de gusa)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ton de gusa)	Pay back (anos)
Turbina de topo (TRT)	32,00	0,11	0,003	20,00
Aumento da injeção de carvão pulverizado (PCI) até 225 kg/t	8,00	0,57	0,014	2,40
Aumento da Injeção de gás natural (GN) até 140 kg/t	7,80	0,90	0,021	1,50
Recuperação do gás de Alto-Forno (BFG)	0,47	0,07	0,002	0,80
Recuperação de calor dos regeneradores	6,50	0,04	0,001	6,00
Automação do processo de pré-aquecimento do ar de injeção	0,47	0,37	0,009	0,40
Melhoria dos sistemas de automação e controle	0,56	0,40	0,010	0,40

Fonte: BNDES (2012)

Tabela 68: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de alto-forno

As opções indicadas para a aciaria a oxigênio são apresentadas na tabela 69 segundo investimento e potencial de economia.

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO (US\$/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (GJ/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ton de aço)	Pay back (anos)
Recuperação de calor sensível do gás de aciaria (LDG)	34,4	0,55	0,013	12,00
Drivers de velocidade variável	0,31	0,03	0,001	8,00

Fonte: BNDES (2012)

Tabela 69: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de aciaria

Atualmente, a maioria do aço produzido é submetida a um processo de lingotamento contínuo, transformando-se em blocos, placas e tarugos, que precisam ser reaquecidos para a laminação na forma final. O lingotamento contínuo integra o lingotamento e a laminação a quente do aço em uma única fase, eliminando a necessidade de reaquecimento do aço antes da laminação. Embora o uso dessa tecnologia contribui para a conservação de energia ainda existe um potencial utilizando controle de processo nos laminadores, utilização de queimadores mais eficientes, controle de oxigênio no sistema de ventilação de ar de combustão, recuperação de calor de água de resfriamento e sistemas de monitoramento automático e de metas em laminadores a frio.

Outra possibilidade de redução de consumo de energia na indústria siderúrgica envolve a aplicação de processos de moldagem ou conformação direta do aço. Correntemente, os metais

são moldados em lingotes ou placas, com a necessidade de reaquecê-los novamente para a conformação do produto final.

Na Tabela 70, algumas opções são apresentadas, de acordo com o investimento e potencial de economia.

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO (US\$/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (GJ/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ton de aço)	Pay back (anos)
Controle de processo nos laminadores de tiras a quente (LTQ)	1,10	0,30	0,007	1,20
Queimadores mais eficientes com sistemas de regeneração e recuperação de gases	3,90	0,70	0,017	1,80
Controle de oxigênio do sistema de ventilação de ar de combustão com uso de VSD	0,79	0,33	0,008	0,80
Recuperação de calor da água de resfriamento do LTQ para geração de vapor	1,30	0,03	0,001	ND
Recuperação de calor de fornos das linhas de tratamento térmico	4,20	0,32	0,008	4,00
Sistemas de monitoramento automático e de metas em laminadores a frio	1,70	0,21	0,005	0,80
Lingotamento <i>Near Net Shape</i>	235,00	3,50	0,084	3,30

Fonte: BNDES (2012)

Tabela 70: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de laminação

Outros potenciais foram identificados nas usinas se destacam como: utilização de drivers de velocidade variável nas etapas de utilidades e aumento de eficiência nos equipamentos da etapa de cogeração (Tabela 71).

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO (US\$/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (GJ/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/Ton de aço)	Pay back (anos)
Drivers de velocidade variável nas utilidades	0,05	0,02	0,000	0,5
Aumento de eficiência em cogeração	22,7	0,38	0,009	6,0

Fonte: BNDES (2012)

Tabela 71: Medidas gerais de eficiência energética para a usinas integradas

Potencial de eficiência

De acordo com as melhores tecnologias, nota-se na Tabela 72, o potencial total de 10,54%, impulsionados pelas medidas de melhora estimadas no sistema térmico e substituição de motores. O potencial foi calculado considerando a diferença entre o rendimento atual e o melhorado, consumo específico e os coeficientes de destinação.

Fonte de energia (GJ/t)	Força motriz	Aquecimento direto	Iluminação	Total (%)
Gás Natural	-	0,14248	-	21,54%
Carvão	-	0,33812	-	10,76%
Outras fontes primarias	-	0,34196	-	12,22%
Óleo combustível	-	0,00028	-	27,99%
Gases de Processo	-	0,15439	-	18,14%
Coq. De carvão min.	-	0,97189	-	10,77%
Elettricidade	0,01329	-	-	0,62%
Total (%)	0,62%	11,83%	0,00%	10,54%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 72: Potencial de economia do subsegmento de aço, Rota 1

5.c2 Subsegmento Produção de Aço via Plantas Integradas (Rota 2 a carvão vegetal)

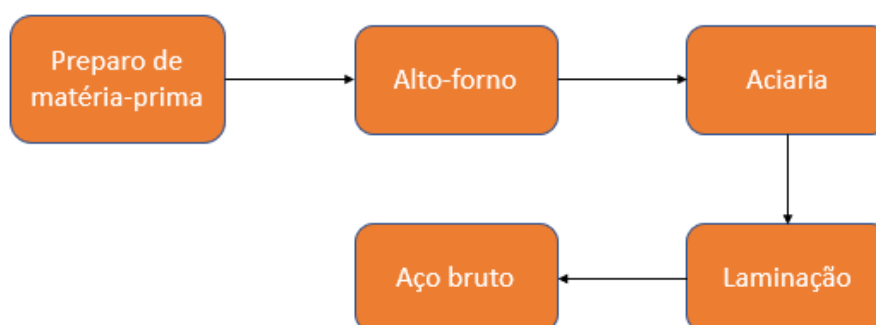
5.c2.i. Situação atual

Neste tópico serão apresentados os dados consolidados das empresas siderúrgicas que correspondem à Rota 2 a carvão vegetal.

5.c2.i.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

Para entendimento deste tópico adotou-se a premissa que a Rota 2 é um processo similar ao o processo de obtenção de aço via planta integrada sem coqueria (Rota 1), porém com o uso do carvão vegetal como matéria-prima. Portanto, neste processo dispensa as etapas de sinterização, uma vez que o coque é produzido a partir do carvão mineral e não do carvão vegetal, e porque o minério de ferro é utilizado na forma de granulados de diversos tipos e pelotas.

De acordo com as considerações acima, na Figura 28 são apresentadas as principais etapas do processo de obtenção de aço via planta integrada com uso do carvão vegetal.



Fonte: Elaboração própria

Figura 28: Diagrama de blocos simplificado do processo produtivo das plantas de aço integradas sem coqueria

5.c2.i.2) Fontes de energia

Dada a diferença na configuração técnica e estrutural de cada planta na Rota 2, as comparações entre usinas, independentemente de serem da mesma rota tecnológica, devem ser realizadas com cautela, uma vez que as tecnologias adotadas variam de *site* para *site*, influenciando o resultado da intensidade de energia (IABr, 2018).

Na conformação industrial da Rota 2, os dados de consumo específico de insumos energéticos da Rota 2 foram compilados e consolidados pelo Instituto Aço Brasil, visando o fornecimento dos valores médios para cada processo industrial considerado. Os dados coletados pelo IABr correspondem à matriz de consumos e produção de energéticos específicos por etapas do processo produtivo e a intensidade energética total.

Rota 2								
Energético (Consumo)	Sinterização	Pelotização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Sistema de Energia e Outros	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	0,307		1,390					1,697
Carvão Vegetal		0,529	8,254					8,783
Coque Metalúrgico	0,539		4,177	0,109				4,825
Gás de Alto-forno	0,056		1,170	0,174	1,065	0,297	1,722	4,484
Gás Natural		0,345	0,090	0,169	1,156	0,114		1,874
Óleo Combustível				0,020	0,038	0,058		0,116
Óleo Diesel						0,036		0,036
GLP			0,002	0,047	0,004	0,011		0,064
Energia Elétrica	0,240	0,173	1,094	1,844	2,125	0,790		6,266
Gases do Ar	0,040		0,271	0,645	0,105	0,019		1,080
Consumo Total	1,182	1,047	16,448	3,008	4,493	1,325	1,722	29,225

Fonte: IABr (2018)

Tabela 73: Distribuição de consumo total de energia na Rota 2, em GJ/t de aço bruto

Energético (Produção)	Sinterização	Pelotização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Sistema de Energia e Outros	Flare	Consumo por energético
Gás de Alto-forno			4,483					4,483
Energia Elétrica			-			0,785		0,785
Produção Total			4,483			0,785		5,268

Fonte: IABr (2018)

Tabela 74: Distribuição de produção energética na Rota 2, em GJ/t de aço bruto

Na Tabela 73, nota-se dois insumos distintos aplicados nessa rota, que são: o carvão vegetal e o carvão mineral/coque metalúrgico. Neste tópico, como já foi explicado, só será considerado o consumo energético proveniente do carvão vegetal.

Vale atentar-se também que na tabela apresentada, o consumo de transformação é considerado. Portanto, para considerar apenas o consumo final de energia da rota deve-se seguir os seguintes itens:

- a) Desconsiderar as etapas de transformação: Na etapa de sistema de energia e outros, há transformação de energia em outras fontes, como eletricidade. Sendo assim, a tabela correspondente sem a participação dessas etapas será:

Portanto, a Tabela 75 corresponde à distribuição de consumo energético da Rota 2 sem a participação dessas etapas.

Rota 2							
Energético (Consumo)	Sinterização	Pelotização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	0,307		1,390				1,697
Carvão Vegetal		0,529	8,254				8,783
Coque Metalúrgico	0,539		4,177	0,109			4,825
Gás de Alto-forno	0,056		1,170	0,174	1,065	1,722	4,187
Gás Natural		0,345	0,090	0,169	1,156		1,760
Óleo Combustível				0,020	0,038		0,058
Óleo Diesel							-
GLP			0,002	0,047	0,004		0,053
Energia Elétrica	0,240	0,173	1,094	1,844	2,125		5,476
Gases do ar	0,040		0,271	0,645	0,105		1,061
Consumo Total	1,182	1,047	16,448	3,008	4,493	1,722	27,900

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 75: Distribuição de consumo energético na Rota 2 em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar as etapas de transformação

Energético (Produção)	Sinterização	Pelotização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Gás de Alto-forno			4,483				4,483
Energia Elétrica							-
Produção Total			4,483				4,483

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 76: Distribuição de produção energética na Rota 2, em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar as etapas de transformação

- b) Descontar na etapa de alto-forno, a produção de energéticos que serão reutilizados em outras etapas de produção de aço: os montantes de produção desses energéticos foram descontados proporcionalmente das etapas correspondentes com propósito de evitar dupla contagem.

A Tabela 77 corresponde a distribuição de consumo energético da Rota 2 com esse tratamento de dados.

Rota 2							
Energético	Sinterização	Pelotização	Alto-Forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	0,307		1,011				1,318
Carvão Vegetal		0,529	6,004				6,533
Coque Metalúrgico	0,539		3,039	0,109			3,687
Gás de Alto-forno	0,056		0,851	0,174	1,065	1,722	3,868
Gás Natural		0,345	0,065	0,169	1,156		1,735
Óleo Combustível				0,020	0,038		0,058
GLP			0,001	0,047	0,004		0,052
Energia Elétrica	0,240	0,173	0,796	1,844	2,125		5,178
Gases do ar	0,040		0,197	0,645	0,105		0,987
Consumo Total	1,182	1,047	11,965	3,008	4,493	1,722	23,417

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 77: Distribuição de consumo energético na Rota 2 em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar a produção de energético na etapa do alto-forno

- c) Vale que nesse tópico somente será abordado o consumo final da produção de aço oriundo apenas do carvão vegetal como matéria-prima, onde ser adotou que a etapa de sinterização será desconsiderada, uma vez que o minério de ferro utilizado, neste caso, é na forma de pelotas e não sínter. Além dessa consideração outras premissas devem ser adotadas:

- i) Nos consumos específicos das etapas referentes a sinterização e pelotização são considerados no denominador as produções físicas referentes apenas às plantas que possuem essas etapas.
- ii) Para as outras etapas, foram considerados os consumos específicos médios da Rota 2 tanto para as plantas a carvão vegetal quanto a coque adquirido.

A Tabela 78 corresponde a distribuição de consumo energético da Rota 2 considerando esse tratamento de dados.

Rota 2						
Energético (Consumo)	Pelotização	Alto-Forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral						-
Carvão Vegetal	0,53	6,00	-	-	-	6,53
Coque Metalúrgico						-
Gás de Alto-forno	-	0,85	0,17	1,07	1,72	3,81
Gás Natural	0,35	0,07	0,17	1,16	-	1,74
Óleo Combustível	-	-	0,02	0,04	-	0,06
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-
GLP	-	0,00	0,05	0,00	-	0,05
Energia Elétrica	0,17	0,80	1,84	2,13	-	4,94
Gases do ar	-	0,20	0,65	0,11	-	0,95
Consumo final	1,047	7,915	2,899	4,493	1,722	18,076

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 78: Distribuição de consumo energético na Rota 2 a carvão vegetal, em GJ/t de aço bruto, após a desconsiderar a etapa de sinterização e os energéticos carvão mineral e coque metalúrgico

d) Adequar os energéticos conforme o Balanço de Energia Útil: Para adaptação da metodologia internacional utilizada como base do BEU foi necessário realocar os energéticos da seguinte forma:

- Carvão = carvão mineral + finos de carvão + carvão metalúrgico;
- Outras fontes primárias = gás de alto-forno + gás de aciaria + gases do ar + outras fontes;
- Gases de processo = gás de coqueria;
- Coque de carvão mineral = coque metalúrgico;
- Eletricidade = energia elétrica;
- Outras fontes secundárias = coque petróleo;
- Alcatrão = alcatrão e derivados.

Rota 2: Integradas sem Coque Próprio						
Energético (Consumo)	Pelotização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Gás Natural	0,345	0,065	0,169	1,156		1,735
Carvão						
Carvão Metalúrgico						
Lenha						
Produtos da Cana						
Outras Fontes Primárias		1,048	0,819	1,170	1,722	4,759
Óleo Diesel						
Óleo Combustível			0,020	0,038		0,058
Gasolina						
GLP		0,001	0,047	0,004		0,052
Querosene						
Gases de Processo						
Coque de Carvão Mineral						
Eletricidade	0,173	0,796	1,844	2,125		4,938
Carvão vegetal	0,529	6,004				6,533
Álcool Etílico						
Outras Fontes Secundárias						
Alcatrão						
Consumo final	1,047	7,915	2,899	4,493	1,722	18,076

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 79: Consumo final para produção de aço na Rota 2 (carvão vegetal), após nomenclatura adequada para o BEU, em GJ/t de aço bruto

Em resumo, pode-se observar que em média, 27,32% do consumo final é de energia elétrica e 72,68% de energia térmica para indústrias que utilizam carvão vegetal.

Na análise dessa rota, observa-se que o principal energético térmico utilizado para consumo final é o carvão vegetal, seguido dos gases oriundos do processo reutilizados em diversas etapas. Já a energia elétrica é consumida principalmente na etapa de laminação.

5.c2.i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores de energia são os mesmos listados no item i.3 do tópico 5.c1. No entanto, algumas etapas por serviço energético da Rota 2 diferem a rota anterior conforme classificado na tabela abaixo:

Rota 2: Integradas sem Coque Próprio							
Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Ilum	Eletr	Outros
Pelotização							
Alto-forno							
Aciaria							
Laminação							
Flare							

Legenda: FM: Força motriz; CP: Calor de processo; AD: Aquecimento direto; Ilum: Iluminação; Eletr: Eletroquímica;
Outros: Outros usos finais.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 80: Distribuição de serviço energético na Rota 2

5.c2.i.4) Indicadores energéticos

Consumo Específico

Considerando o tratamento de dados do item i.2, o consumo específico final é de 18,076 GJ/ton de aço bruto, conforme a Tabela 79.

Rendimentos Energéticos

Para estabelecimento do rendimento médio por fonte e energético foi considerado que os energéticos que participavam da mesma etapa de produção teriam o mesmo rendimento. Já quando o mesmo energético participa de mais de uma etapa de produção, o rendimento resultante é calculado através de uma média dos rendimentos por etapa, ponderados pela energia consumida em cada uma delas.

O rendimento para eletricidade no serviço força motriz foi obtido através da média dos motores em diferentes tipos de potência de acordo com o modelo da Weg e para o serviço de iluminação foi utilizado o valor correspondente ao rendimento das lâmpadas com tecnologia LED, conforme divulgado pela referência HTL (s.d).

Conforme a metodologia adotada, as etapas foram alocadas dentro de cada serviço energético conforme item 5.c.i.2, resultando na Tabela 81:

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	38,0	-	-	-	-
Carvão	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	36,6	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	45,1	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	70,5	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	95,5	-	-	-	85,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	72,1	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base nas referências de rendimento das etapas produtivas

Tabela 81: Rendimento energético por serviço energético da Rota 2 (carvão vegetal), em %

Coeficientes de destinação

Para estabelecer os coeficientes de destinação, foram calculadas as porcentagens de energia a cada uso final (Tabela 82). Todo consumo final térmico da Rota 2 é utilizado para aquecimento direto.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	100,0	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	99,5	-	-	-	0,05	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base na metodologia do BEU

Tabela 82: Coeficiente de destinação por serviço energético da Rota 2, em %

5.c2.ii. Condições com tecnologias mais eficientes

5.c2.ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As etapas de processo produtivo, no cenário alternativo, continuarão sendo as mesmas do cenário atual.

Conforme mencionado anteriormente, a adotou-se a premissa que para esse caso a Rota 2 é um processo similar ao processo de obtenção de aço via planta integrada (Rota 1), porém com o uso do carvão vegetal como matéria-prima, utilizado na forma de granulados de diversos tipos e pelotas.

Sendo assim, pode-se considerar que todas as medidas propostas na Rota 1, com exceção das medidas direcionadas às etapas de coqueria e sinterização são aplicáveis a essa rota em análise.

É importante mencionar, que a grande diferença entre o processo da Rota 1 e da Rota 2 via carvão metalúrgico, em relação ao processo da Rota 2 via carvão vegetal é a estrutura e dimensões dos altos-fornos, uma vez que os dois primeiros utilizam o minério de ferro na forma de sínter e o último utiliza granulados e pelotas. Com isso, o dimensionamento dos fornos que utilizam pelotas deve ser mais robusto do que os fornos que utilizam sínter, devido a maior granulometria das pelotas.

5.c2.ii.2) Indicadores Energéticos

Consumo específico

Conforme a grande complexidade e inúmeras variáveis envolvidas na análise e avaliação da implementação de tecnologias alternativas, foi necessário fazer estimativas baseadas na experiência de um consultor em metas de redução do consumo dos energéticos e aumento da produtividade do setor. Nessas estimativas, é preciso atentar-se que não foram considerados estudos de pré-viabilidade necessários para desenvolver cada uma dessas medidas.

Dessa forma, como foi demonstrado na descrição das medidas de eficiência energética no item 5.c1.ii, a estimativa da redução do consumo dos principais energéticos, refere-se a testes em equipamentos específicos e para esse estudo, esses testes serão generalizados para todo o subsegmento das indústrias integradas de aço.

É importante lembrar que foram utilizados dados teóricos da literatura, que no momento são os mais atualizados, mas no futuro podem ser modificados, e por isso vir a alterar o perfil de eficiência energética do segmento.

Desse modo para o estabelecimento do consumo específico melhorado e do rendimento melhorado foram selecionadas as medidas aplicáveis a equipamentos relacionadas a primeira transformação, conforme os conceitos de rendimento do BEU.

Para a estimativa do potencial de energia na rota 2, foi considerado os rendimentos dos equipamentos que utilizam energia térmica já calculados na rota 1. Esse tratamento foi

necessário pois não foi informado a produção dos produtos intermediários referentes a rota 2 a carvão vegetal. Para o rendimento elétrico foi considerado a média dos melhores rendimentos de motores informados pela WEG e a premissa que todas as usinas já adotam o uso da tecnologia LED para sistema de iluminação.

De acordo com essas considerações, a seguir será apresentada a estimativa do consumo específico de cada etapa do processo de produção de aço.

Pelotização

Na etapa de pelletização para plantas integradas, não foram identificadas medidas de redução de consumo térmico, portanto o consumo específico melhorado térmico não será alterado. Já para o sistema elétrico, a proposta adotada foi a substituição de motores (Tabela 83).

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	0,173	0,874	1,047
CE melhorado	0,172	0,874	1,046
Potencial	0,001	-	0,031
% melhoria	0,62%	-	0,10%

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base em BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 83: Consumo específico da etapa de pelletização da Rota 2

Alto-forno

Na etapa de alto-forno foi adotado o rendimento calculado na Rota 1. O rendimento foi obtido através das medidas térmicas referente ao aumento da injeção de carvão pulverizado (PCI), automatização do processo de pré-aquecimento do ar de injeção e melhoria dos sistemas de automação e controle no serviço de aquecimento direto. Para melhoria elétrica foi adotada a substituição de motores.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	0,796	7,119	7,915
CE melhorado	0,791	6,340	7,130
Potencial	0,005	0,780	0,785
% melhoria	0,62%	10,95%	9,92%

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base em IABr (2018), BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 84: Consumo específico da etapa de alto-forno da Rota 2

Aciação

Na etapa de aciaria foi adotado o rendimento calculado na Rota 1. Os rendimentos foram obtidos através das medidas térmicas referente à adição de *drivers* de velocidade variável no serviço de aquecimento direto. E como melhoria elétrica a substituição de motores.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	1,844	1,832	2,899
CE melhorado	1,055	0,892	2,725
Potencial	0,012	0,163	0,174
% melhoria	0,62%	15,43%	6,01%

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base em IABr (2018), BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 85: Consumo específico da etapa de aciaria da Rota 2

Laminação

Na etapa de laminação foram adotadas as medidas térmicas de controle de oxigênio do sistema de ventilação de ar de combustão com uso de VSD no serviço de aquecimento direto. Para melhoria elétrica foi adotado o rendimento médio dos motores de alto rendimento presentes no catálogo da WEG.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	2,125	2,368	4,493
CE melhorado	2,122	1,705	3,814
Potencial	0,013	0,663	0,676
% melhoria	0,62%	27,99%	15,05%

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base em IABr (2018), BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 86: Consumo específico da etapa de laminação da Rota 2

Consolidado

Considerando o tratamento de dados do item 5.c.ii.2, o consumo específico final é de 16,440 GJ/ton de aço bruto.

Rendimentos energéticos

O rendimento melhorado por etapa foi calculado a partir do rendimento atual e aplicando o potencial de economia das medidas relacionadas à primeira transformação de energia, apresentado no item anterior (consumo específico). Foi utilizado o rendimento melhorado de cada etapa para todas as respectivas fontes térmicas. Por fim, o rendimento melhorado de cada fonte por serviço energético foi obtido ponderando-se o rendimento de cada etapa pelo consumo da fonte em cada etapa (Tabela 87).

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	47,4	-	-	-	-
Carvão	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	43,8	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	57,4	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	83,8	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Elettricidade	95,5	-	-	-	85,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	80,6	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base nas referências de rendimento das etapas produtivas

Tabela 87: Rendimento energético por serviço energético, em %

Coeficiente de destinação

Na Tabela 88 são mostrados os coeficientes de destinação da Rota 1 que faz referência às porcentagens que são destinadas a cada uso final da energia, para a situação com tecnologias mais eficientes.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	99,5	-	-	-	0,5	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 88: Rendimento energético por serviço energético, em %

Investimentos necessários para implantação de medidas básicas de eficiência.

Os custos para reposição do equipamento atual (quando aplicável), o custo do equipamento eficiente, o percentual de economia de energia e economia por energia de matéria-prima (aço bruto) consumido das medidas de eficiência energética identificadas para o segmento de produção de aço via plantas integradas a carvão vegetal foram apresentadas no item 5.c.1.ii

Potencial de eficiência

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas, nota-se na Tabela 89, o potencial total de 10,32%, impulsionados pelas medidas de melhora estimadas no sistema térmico e substituição de motores. O potencial foi calculado considerando a diferença entre o rendimento atual e o melhorado, consumo específico e os coeficientes de destinação.

Fonte de energia (GJ/t)	Força motriz	Aquecimento direto	Iluminação	Total (%)
Gás natural	-	0,34500	-	19,88%
Outras fontes primárias	-	0,78359	-	16,46%
Óleo combustível	-	0,01241	-	21,40%
GLP	-	0,00828	-	15,78%
Eletricidade	0,03068	-	-	0,62%
Carvão vegetal	-	0,68564	-	10,49%
Total (%)	0,62%	13,97%	0,00%	10,32%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 89: Potencial de economia do subsegmento de aço, Rota 2 a carvão vegetal

5.c3 Subsegmento Produção de Aço via Plantas Integradas (Rota 2 a coque metalúrgico sem coqueria)

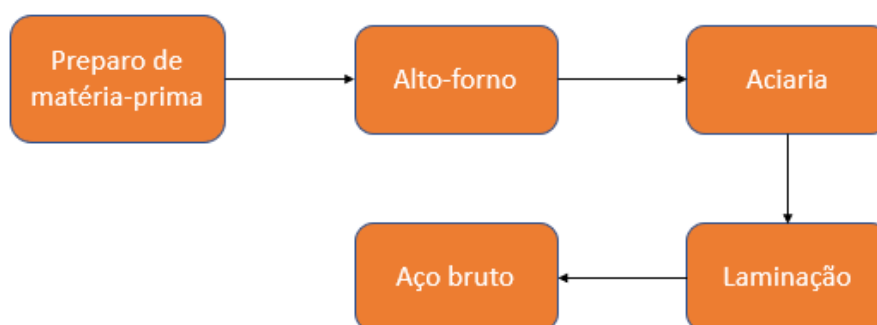
5.c3.i. Situação atual

Neste tópico serão apresentados os dados consolidados das empresas siderúrgicas que correspondem a Rota 2 (a coque metalúrgico sem coqueria).

5.c3.i.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

Para entendimento deste tópico adotou-se a premissa que para este caso a Rota 2 é um processo similar ao o processo de obtenção de aço via planta integrada (Rota 1). Portanto, neste processo dispensa as etapas de coqueria. Neste caso o minério de ferro é utilizado na forma de granulados de diversos tipos e sinter, diferente da Rota 2 (item 5.c.i.2) que utiliza granulados e pelotas conforme discutido anteriormente

De acordo com as considerações acima, na Figura 29 são apresentadas as principais etapas do processo de produção de aço na via rota tecnológica com uso de coque metalúrgico sem coqueria.



Fonte: Elaboração própria

Figura 29: Diagrama de blocos simplificado do processo produtivo das plantas de aço integradas de coque metalúrgico sem coqueria

5.c3.i.2) Fontes de energia

Dada a diferença na configuração técnica e estrutural de cada planta, as comparações entre usinas, independentemente de serem da mesma rota tecnológica, devem ser realizadas com cautela, uma vez que as tecnologias adotadas variam de *site* para *site*, influenciando o resultado da intensidade de energia (IABr, 2018).

Na conformação industrial da Rota 2, os dados de consumo específico de insumos energéticos foram compilados e consolidados, pelo Instituto Aço Brasil, visando o fornecimento dos valores médios para cada processo industrial considerado. Os dados coletados pelo IABr (Tabela 90) correspondem a matriz de consumos e produção de energéticos específicos por etapas do processo produtivo e a intensidade energética total.

Rota 2: Integradas sem Coque Próprio								
Energético (Consumo)	Sinterização	Pelotização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Sistema de Energia e Outros	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	0,307		1,390					1,697
Carvão Vegetal		0,529	8,254					8,783
Coque Metalúrgico	0,539		4,177	0,109				4,825
Gás de Alto-forno	0,056		1,170	0,174	1,065	0,297	1,722	4,484
Gás Natural		0,345	0,090	0,169	1,156	0,114		1,874
Óleo Combustível				0,020	0,038	0,058		0,116
Óleo Diesel						0,036		0,036
GLP			0,002	0,047	0,004	0,011		0,064
Energia Elétrica	0,240	0,173	1,094	1,844	2,125	0,790		6,266
Gases do ar	0,040		0,271	0,645	0,105	0,019		1,080
Consumo Total	1,182	1,047	16,448	3,008	4,493	1,325	1,722	29,225

Fonte: IABr (2018)

Tabela 90: Distribuição de consumo energético na Rota 2, em GJ/t de aço bruto

Energético (Produção)	Sinterização	Pelotização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Sistema de Energia e Outros	Flare	Consumo por energético
Gás de Alto-forno			4,483					4,483
Energia Elétrica						0,785		0,785
Produção Total			4,483			0,785		5,268

Fonte: IABr (2018)

Tabela 91: Distribuição de produção energética na Rota 2, em GJ/t de aço bruto

Na Tabela 90, notam-se dois insumos distintos aplicados nessa rota, que são: o carvão vegetal e o carvão mineral/coque metalúrgico. Neste tópico, como já foi explicado, só será considerado o consumo energético proveniente do carvão mineral/coque metalúrgico.

Vale atentar que na Tabela 90, o consumo transformação é considerado. Portanto, para considerar apenas o consumo final de energia deve-se seguir os seguintes itens:

- Desconsiderar as etapas de transformação: Na etapa de sistema de energia e outros, há transformação de energia em outras fontes, como eletricidade. Sendo assim, a tabela correspondente sem a participação dessas etapas será:

Rota 2: Integradas sem Coque Próprio							
Energético (Consumo)	Sinterização	Pelotização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	0,307		1,390				1,697
Carvão Vegetal		0,529	8,254				8,783
Coque Metalúrgico	0,539		4,177	0,109			4,825
Gás de Alto-forno	0,056		1,170	0,174	1,065	1,722	4,187
Gás Natural		0,345	0,090	0,169	1,156		1,760
Óleo Combustível				0,020	0,038		0,058
GLP			0,002	0,047	0,004		0,053
Energia Elétrica	0,240	0,173	1,094	1,844	2,125		5,476
Gases do ar	0,040		0,271	0,645	0,105		1,061
Consumo Total	1,182	1,047	16,448	3,008	4,493	1,722	27,900

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 92: Distribuição de consumo energético na Rota 2, em GJ/t de aço bruto

Energético (Produção)	Sinterização	Pelotização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Gás de Alto-forno			4,483				4,483
Produção Total			4,483				4,483

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 93: Distribuição de produção energética na Rota 2, em GJ/t de aço bruto

- b) Descontar na etapa de alto-forno, a produção de energéticos que serão reutilizados em outras etapas de produção de aço: os montantes de produção desses energéticos foram descontados proporcionalmente das etapas correspondentes com propósito de evitar dupla contagem.

A Tabela 94 corresponde à distribuição de consumo energético da Rota 2 com esse tratamento de dados.

Rota 2							
Energético (Consumo)	Sinterização	Pelotização	Alto- Forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	0,307		1,011				1,318
Carvão Vegetal		0,529	6,004				6,533
Coque Metalúrgico	0,539		3,039	0,109			3,687
Gás de Alto-forno	0,056		0,851	0,174	1,065	1,722	3,868
Gás Natural		0,345	0,065	0,169	1,156		1,735
Óleo Combustível			0,000	0,020	0,038		0,058
GLP			0,001	0,047	0,004		0,052
Energia Elétrica	0,240	0,173	0,796	1,844	2,125		5,178
Gases do ar	0,040		0,197	0,645	0,105		0,987
Consumo Total	1,182	1,047	11,965	3,008	4,493	1,722	23,417

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 94: Distribuição de consumo energético na Rota 2, em GJ/t de aço bruto, após a eliminação das etapas de transformação

c) Vale atentar que nesse tópico somente será abordado o consumo final de aço oriundo de carvão mineral/coque metalúrgico como matéria-prima e por isso a etapa de pelotização será desconsiderada, visto que o minério de ferro utilizado neste caso é na forma de sinter e não pelotas. Além dessa consideração outras premissas devem ser adotadas:

i) Nos consumos específicos das etapas referentes a sinterização e pelotização são considerados no denominador as produções físicas referentes apenas às plantas que possuem essas etapas.

ii) Para as outras etapas, consideraram-se os consumos específicos médios da rota 2 tanto para as plantas a carvão vegetal quanto a coque adquirido.

A Tabela 95 corresponde a distribuição de consumo de energia da Rota 2 considerando esse tratamento de dados.

Rota 2: Integradas sem Coque Próprio						
Energético (Consumo)	Sinterização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Carvão Mineral	0,31	1,01	-	-	-	1,318
Coque Metalúrgico	0,54	3,04	0,11	-	-	3,687
Gás de Alto-forno	0,06	0,85	0,17	1,07	1,72	3,868
Gás Natural	-	0,07	0,17	1,16	-	1,390
Óleo Combustível	-	-	0,02	0,04	-	0,058
GLP	-	0,00	0,05	0,00	-	0,052
Energia Elétrica	0,24	0,80	1,84	2,13	-	5,005
Gases do ar	0,04	0,20	0,65	0,11	-	0,987
Consumo final	1,182	5,961	3,008	4,493	1,722	16,366

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 95: Distribuição de consumo energético na Rota 2 a coque metalúrgico, em GJ/t de aço bruto, após desconsiderar a etapa de pelotização e o energético carvão vegetal

d) Adequar os energéticos conforme o Balanço de Energia Útil (BEU): Para adaptação da metodologia internacional utilizada como base do BEU foi necessário realocar os energéticos da seguinte forma:

- Carvão = carvão mineral + finos de carvão + carvão metalúrgico;
- Outras fontes primárias = gás de alto-forno + gás de aciaria + gases do ar + outras fontes;
- Gases de processo = gás de coqueria;
- Coque de carvão mineral = coque metalúrgico;
- Eletricidade = energia elétrica;
- Outras fontes secundárias = coque petróleo;
- Alcatrão = alcatrão e derivados.

Rota 2: Integradas sem Coque Próprio						
Energético (Consumo)	Sinterização	Alto-forno	Aciaria	Laminação	Flare	Consumo por energético
Gás Natural		0,065	0,169	1,156		1,390
Carvão	0,307	1,011				1,318
Carvão Metalúrgico						
Lenha						
Produtos da Cana						
Outras Fontes Primárias	0,096	1,048	0,819	1,170	1,722	4,855
Óleo Diesel						
Óleo Combustível			0,020	0,038		0,058
Gasolina						
GLP		0,001	0,047	0,004		0,052
Querosene						
Gases de Processo						
Coque de Carvão Mineral	0,539	3,039	0,109			3,687
Eletricidade	0,240	0,796	1,844	2,125		5,005
Carvão vegetal						
Álcool Etílico						
Outras Fontes Secundárias						
Alcatrão						
Consumo final	1,182	5,961	3,008	4,493	1,722	16,366

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 96: Consumo final para produção de aço na Rota 2, após nomenclatura adequada para o BEU, em GJ/t de aço bruto

Em resumo, pode-se observar que em média, 30,58% do consumo é de energia elétrica e 69,42% de energia térmica para indústrias que utilizam coque metalúrgico adquirido.

5.c3.i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Da mesma forma que a Rota 1, os principais equipamentos consumidores de energia são os mesmos listados no item i.3 do tópico 5.c1. No entanto, algumas etapas da Rota 2 por serviço energético diferem a rota anterior conforme classificado na tabela abaixo:

Rota 2: Integradas sem Coque Próprio							
Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Ilum	Eletr	Outros
Sinterização							
Alto-forno							
Aciaria							
Laminação							
Flare							

Legenda: FM: Força motriz; CP: Calor de processo; AD: Aquecimento direto; Ilum: Iluminação; Eletr: Eletroquímica; Outros: Outros usos finais.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 97: Distribuição por serviço energético na Rota 2

5.c3.i.4) Indicadores energéticos

Consumo Específico

Considerando o tratamento de dados do item i.2, o consumo específico final é de 16,366 GJ/ton de aço bruto, conforme a Tabela 96.

Rendimentos Energéticos

Para estabelecimento do rendimento médio por energético foi considerado que os energéticos que participavam da mesma etapa de produção teriam o mesmo rendimento. Já quando o mesmo energético participa de mais de uma etapa de produção, o rendimento resultante é calculado através de uma média dos rendimentos por etapa, ponderados pela energia consumida em cada uma delas.

O rendimento para eletricidade no serviço força motriz foi obtido através da média dos motores em diferentes tipos de potência de acordo com o modelo da Weg e para o serviço de iluminação foi utilizado o valor correspondente ao rendimento das lâmpadas com tecnologia LED, conforme divulgado pela referência HTL (s.d).

Conforme a metodologia adotada, as etapas foram alocadas dentro de cada serviço energético conforme item 5.c.i.2, resultando na Tabela 98:

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	37,45	-	-	-	-
Carvão	-	-	68,17	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	36,77	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	45,12	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	70,55	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	70,66	-	-	-	-
Eleticidade	95,5	-	-	-	85,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base nas referências de rendimento das etapas produtivas

Tabela 98: Rendimento energético por serviço energético da Rota 2 (coque metalúrgico), em %

Coeficientes de destinação

Para estabelecer os coeficientes de destinação foram calculadas as porcentagens de energia a cada uso final (Tabela 99). Todo consumo final térmico é utilizado para aquecimento direto.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Elettricidade	99,5	-	-	-	0,5	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base na metodologia do BEU

Tabela 99: Coeficiente de destinação por serviço energético da Rota 2, em %

5.c3.ii. Condições com tecnologias mais eficientes

5.c3.ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As etapas de processo produtivo, no cenário alternativo, continuarão sendo as mesmas do cenário atual.

Da mesma forma como mencionado para a Rota 2 via carvão vegetal, para a Rota 2 via coque metalúrgico sem coqueria adotou-se a premissa que, para esse caso a Rota é um processo similar ao processo de obtenção de aço via planta integrada (Rota 1) com uso do síter e do coque adquirido de terceiros.

Sendo assim, também é possível admitir que todas as medidas propostas na Rota 1, com exceção das medidas direcionadas às etapas de coqueria são aplicáveis a essa rota em análise.

5.c3.ii.2) Indicadores Energéticos

Consumo específico

Conforme a grande complexidade e inúmeras variáveis envolvidas na análise e avaliação da implementação de tecnologias alternativas, foi necessário fazer estimativas baseadas na experiência do consultor em metas de redução do consumo dos energéticos e aumento da produtividade do setor. Nessas estimativas, é preciso atentar-se que não foram considerados estudos de pré-viabilidade necessários para desenvolver cada uma dessas medidas.

Dessa forma, como foi demonstrado na descrição das medidas de eficiência energética no item anterior, a estimativa da redução do consumo dos principais energéticos refere-se a testes em equipamentos específicos e para esse estudo, esses testes serão generalizados para todo o subsegmento das indústrias integradas de aço.

É importante lembrar que foram utilizados dados teóricos da literatura, que no momento são os mais atualizados, mas no futuro podem ser modificados, e por isso vir a alterar o perfil de eficiência energética do segmento.

Desse modo para o estabelecimento do consumo específico melhorado e do rendimento melhorado foram selecionadas as medidas aplicáveis a equipamentos relacionadas a primeira transformação, conforme os conceitos de rendimento do BEU.

Para a estimativa do potencial de energia na Rota 2, foi considerado os rendimentos dos equipamentos que utilizam energia térmica já calculados na Rota 1. Esse tratamento foi necessário pois não foi informado a produção dos produtos intermediários referentes a rota 2 a carvão vegetal. Para o rendimento elétrico foi considerado a média dos melhores rendimentos de motores informados pela WEG e a premissa que todas as usinas já adotam o uso da tecnologia LED para sistema de iluminação.

De acordo com essas considerações, a seguir será apresentada a estimativa do consumo específico de cada etapa do processo de produção de aço.

Sinterização

Na etapa de sinterização foi adotado o rendimento calculado na Rota 1. O rendimento melhorado foi calculado através das medidas térmicas referentes ao aumento da profundidade do leito, melhoria dos processos de automatização e do controle dos processos. Já para o sistema elétrico, a proposta adotada foi a substituição de motores (Tabela 100).

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	0,240	0,942	1,182
CE melhorado	0,239	0,856	1,095
Potencial	0,001	0,086	0,087
% melhoria	0,62%	9,03%	7,32%

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base no IABr (2018) BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 100: Consumo específico da etapa de sinterização da Rota 2

Alto-forno

Na etapa de alto-forno foi adotado o rendimento calculado na Rota 1. O rendimento foi obtido através das medidas térmicas referente ao aumento da injeção de carvão pulverizado (PCI), automatização do processo de pré-aquecimento do ar de injeção e melhoria dos sistemas de automação e controle no serviço de aquecimento direto. Para melhoria elétrica foi adotada a substituição de motores.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	0,796	5,165	5,961
CE melhorado	0,791	4,599	5,390
Potencial	0,005	0,566	0,571
% melhoria	0,62%	10,96%	9,58%

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base no IABr (2018) BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 101: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 2

Aciaria

Na etapa de aciaria foi adotado o rendimento calculado na Rota 1. Os rendimentos foram obtidos através das medidas térmicas referente à adição de *drivers* de velocidade variável no serviço de aquecimento direto. E como melhoria elétrica a substituição de motores.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	1,844	1,164	3,088
CE melhorado	1,832	0,985	2,817
Potencial	0,012	0,179	0,191
% melhoria	0,62%	15,43%	6,35%

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base no IABr (2018) BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 102: Consumo específico da etapa de aciaria da Rota 2

Laminação

Na etapa de laminação foram adotadas as medidas térmicas de controle de oxigênio do sistema de ventilação de ar de combustão com uso de VSD no serviço de aquecimento direto. E como melhoria elétrica a substituição de motores.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	2,125	2,368	4,493
CE melhorado	2,122	1,702	3,814
Potencial	0,013	0,666	0,679
% melhoria	0,62%	28,11%	15,11%

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base no IABr (2018) BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 103: Consumo específico da etapa de laminação da Rota 2

Consolidado

Considerando o tratamento de dados do item ii.2, o consumo específico final é de 14,838 GJ/ton de aço bruto, conforme as Tabelas 100 a 103.

Rendimentos energéticos

O rendimento melhorado por etapa foi calculado a partir do rendimento atual e aplicando o potencial de economia das medidas relacionadas à primeira transformação de energia, apresentado no item anterior (consumo específico). Foi utilizado o rendimento melhorado de cada etapa para todas as respectivas fontes térmicas. Por fim, o rendimento melhorado de cada fonte por serviço energético foi obtido ponderando-se o rendimento de cada etapa pelo consumo da fonte em cada etapa.

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	-	49,2	-	-	-	-
Carvão	-	-	76,3	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-		-	-	-	-
Lenha	-	-		-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-		-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	43,9	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-		-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	57,4	-	-	-	-
Gasolina	-	-		-	-	-	-
GLP	-	-	83,8	-	-	-	-
Querosene	-	-		-	-	-	-
Gases de Processo	-	-		-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	79,3	-	-	-	-
Eleticidade	95,5	-		-	85,0	-	-
Carvão vegetal	-	-		-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base nas referências de rendimento das etapas produtivas

Tabela 104: Rendimento energético por serviço energético, em %

Coeficiente de destinação

Na Tabela 105 são mostrados os coeficientes de destinação da Rota 2 que faz referência às porcentagens que são destinadas a cada uso final da energia, para a situação com tecnologias mais eficientes.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo*	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Eletricidade	99,5	-	-	-	0,5	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 105: Coeficiente de destinação por serviço energético, em %

Investimentos necessários para implantação de medidas básicas de eficiência.

Os custos para reposição do equipamento atual (quando aplicável), o custo do equipamento eficiente, o percentual de economia de energia e economia por energia de matéria-prima (aço bruto) consumido das medidas de eficiência energética identificadas para o segmento de produção de aço via plantas integradas a coque e carvão mineral foram apresentadas no item 5.c.1.ii.

Potencial de eficiência

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas, nota-se o potencial total de 10,50%, impulsionados pelas medidas de melhora estimadas no sistema térmico e troca de motores, Tabela 106. O potencial foi calculado considerando a diferença entre o rendimento atual e o melhorado, consumo específico e os coeficientes de destinação.

Fonte de energia (GJ/t)	Força motriz	Aquecimento direto	Iluminação	Total (%)
Gás natural	-	0,33242	-	23,91%
Carvão	-	0,14029	-	10,64%
Outras fontes primárias	-	0,79120	-	16,30%
Óleo combustível	-	0,01241	-	21,40%
GLP	-	0,00828	-	15,78%
Coque de Carvão Mineral	-	0,40203	-	10,91%
Eletricidade	0,03109	-	-	0,62%
Total (%)	0,62%	14,85%	0,00%	10,50%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 106: Potencial de economia do subsegmento de aço, Rota 2 a carvão/coque metalúrgico

5.c4 Subsegmento Produção de Aço via plantas que reaproveitam sucata

5.c4.i. Situação atual

5.c4.i.1) Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

O processo de produção das usinas semi-integradas ou *mini mills* é formado apenas pelas etapas de refino e a laminação. Este processo utiliza a sucata ferrosa como insumo básico, o qual sofre depuração química em fornos elétricos, tendo a eletricidade como fonte de energia predominante (CANDIDO, M. R., s.d.).

É comum admitir que a sucata ferrosa já conta com o carbono em sua constituição, portanto, nem mesmo do ponto de vista da composição química é necessária a utilização do carvão mineral. O processo de finalização do aço, a laminação, é semelhante a que ocorre nas usinas integradas (CANDIDO, M. R., s.d.).

Essas usinas são denominadas *mini mills* (mini-usinas), devido ao caráter mais compacto da produção semi-integrada e a escala mínima, em comparação às usinas integradas, essas são bastante inferior. A capacidade de operar eficientemente em menor escala é devido a possibilidade de operar sem os altos-fornos, equipamentos extremamente propensos a retornos crescentes de escala (CANDIDO, M. R., s.d.).

Os principais tipos de fornos utilizados nas usinas semi-integradas são: forno a arco indireto, forno a arco direto, forno a indução e forno de resistência. Nestes fornos é feita a fusão e um primeiro refino oxidante.

O tratamento secundário do aço líquido é feito em painéis de manutenção e transporte. A maneira mais simples de tratar os aços na panela consiste em adicionar desoxidantes, dessulfurantes, formadores de escória e pequenas quantidades de elementos de liga no jato de vazamento.

5.c4.i.2) Fontes de energia

Dada a diferença na configuração técnica e estrutural de cada planta, as comparações entre usinas, independentemente de serem da mesma rota tecnológica, devem ser realizadas com cautela, uma vez que as tecnologias adotadas variam de *site* para *site*, influenciando o resultado da intensidade de energia (IABr, 2018).

Na conformação industrial das usinas semi-integradas (<50% gusa), os dados de consumo específico dos insumos energéticos foram compilados e consolidados pelo Instituto Aço Brasil, afim de fornecer os valores médios de energia para cada processo industrial considerado. Os dados coletados pelo IABr (Tabela 107) correspondem à matriz de consumos energéticos específicos por etapas do processo produtivo e a intensidade energética total no ano base de 2015.

Rota 3: Semi-Integradas				
Energético (Consumo)	Aciaria	Laminação	Outros Total	Consumo por energético
Energia Elétrica	5,271	0,989	1,448	7,708
Gás Natural	0,377	1,105	0,062	1,544
Coque de Petróleo	0,003	-	0,000	0,003
O2-N2-Argônio	0,307	0,000	0,005	0,312
Carvão Metalúrgico Nacional	0,007	-	-	0,007
Coque Metalúrgico	0,139	-	-	0,139
Óleo Diesel	-	-	0,005	0,005
Água Industrial	-	-	0,001	0,001
Carvão Energético	0,022	-	-	0,022
Água Potável	-	-	0,001	0,001
Vapor de Baixa Pressão	0,006	0,009	-	0,015
Consumo total	6,132	2,103	1,522	9,757

Fonte: IABr (2018)

Tabela 107: Distribuição de consumo total de energia na Rota 3, em GJ/t de aço bruto

Vale atentar que na Tabela 107 está apresentado o consumo de energéticos que não são considerados consumo final de energia. Portanto para considerar apenas o consumo final deve-se seguir os itens abaixo:

- Descontar os insumos não energéticos: neste caso água potável e industrial serão desconsiderados. Dessa forma, a nova distribuição de consumo de energia da rota 3 é apresentada na Tabela 108.

Rota 3: Semi-Integradas				
Energético (Consumo)	Aciaria	Laminação	Outros Total	Consumo por energético
Energia Elétrica	5,271	0,989	1,448	7,708
Gás Natural	0,377	1,105	0,062	1,544
Coque de Petróleo	0,003	-	-	0,003
O2-N2-Argônio	0,307	-	0,005	0,312
Carvão Metalúrgico Nacional	0,007	-	-	0,007
Coque Metalúrgico	0,139	-	-	0,139
Óleo Diesel	-	-	0,005	0,005
Carvão Energético	0,022	-	-	0,022
Vapor de Baixa Pressão	0,006	0,009	-	0,015
Consumo final	6,132	2,103	1,520	9,755

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 108: Distribuição de consumo final de energia na Rota 3 em GJ/ t de aço bruto, após a desconsiderar os insumos não energéticos

b) Adequar os energéticos conforme o Balanço de Energia Útil: Para adaptação da metodologia internacional utilizada como base do BEU foi necessário realocar os energéticos da seguinte forma:

- Gás natural = gás natural + vapor de baixa pressão + O₂ - N₂ - argônio;
- Carvão = carvão energético + carvão metalúrgico nacional;
- Eletricidade = energia elétrica;
- Outras fontes secundárias = coque petróleo;
- Alcatrão = alcatrão e derivados.

Rota 3: Semi-Integradas				
Energético (Consumo)	Aciaria	Laminação	Outros Total	Consumo por energético
Gás Natural	0,690	1,114	0,067	1,871
Carvão	0,029			0,029
Carvão Metalúrgico				
Lenha				
Produtos da Cana				
Outras Fontes Primárias				
Óleo Diesel			0,005	0,005
Óleo Combustível				
Gasolina				
GLP				
Querosene				
Gases de Processo				
Coque de Carvão Mineral	0,139			0,139
Eletricidade	5,271	0,989	1,448	7,708
Carvão vegetal				
Álcool Etílico				
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	0,003			0,003
Alcatrão				
Consumo final	6,132	2,103	1,520	9,755

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IABr (2018)

Tabela 109: Distribuição de consumo final de energia na Rota 3, em GJ/t de aço bruto, após nomenclatura adequada para o BEU

Em resumo, após o tratamento de dados nota-se que 79,02% do consumo é de energia elétrica e 20,98% de energia térmica para indústrias que reaproveitam sucata para produção de aço.

Na análise dessa rota, observa-se que o principal energético utilizado para consumo final é a energia elétrica.

5.c4.i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores de energia na Rota 3 estão listados abaixo:

- *Shredders*, correias transportadoras, empilhadeiras (preparo da sucata);
- Forno elétrico a arco;
- Forno panela;
- Forno de reaquecimento de semi-acabados na laminação (tarugos, placas, blocos, etc...);
- Laminadores;
- Motores, ventiladores de exaustão, ventiladores de resfriamento, bombas e outros equipamentos elétricos;
- Correias transportadoras, caminhões, veículos e equipamentos móveis.

Para melhor entendimento da distribuição do consumo energético, na Tabela 110 é classificado o consumo final das principais etapas produtivas por serviço energético.

Rota 3: Semi-Integradas							
Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Ilum	Electr	Outros
Aciaria			Todas as fontes		Eletricidade		
Laminação	Eletricidade		Fontes Térmicas		Eletricidade		
Outros Totais	Eletricidade e óleo diesel	Gás natural			Eletricidade		

Legenda: FM: Força motriz; CP: Calor de processo; AD: Aquecimento direto; Ilum: Iluminação; Electr: Electroquímica; Outros: Outros usos finais.

Fonte: Elaboração própria com base em dados de campo

Tabela 110: Distribuição de serviço energético na Rota 3

5.c4.i.4) Indicadores energéticos

Consumo Específico

Considerando o tratamento de dados do item i.2, o consumo específico final é de 9,755 GJ/ton de aço bruto, conforme a Tabela 109.

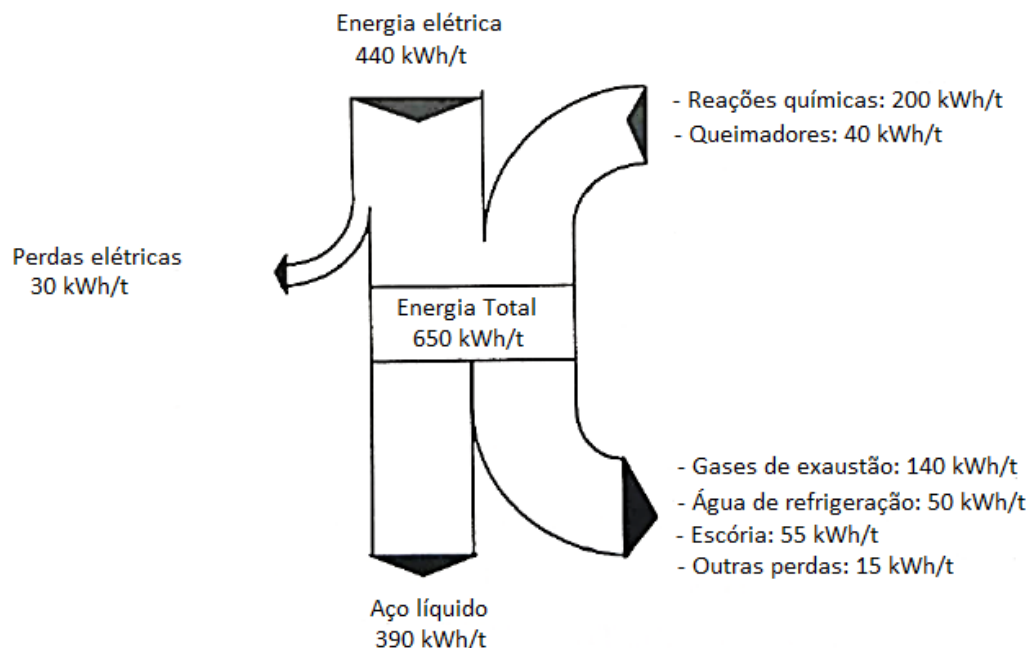
Rendimentos energéticos

Os rendimentos atuais por serviço energético foram obtidos com base em estudos de caso. O rendimento é calculado a partir do balanço de energia de cada processo com base na

energia de entrada e no somatório das perdas. A seguir serão apresentados os rendimentos atuais por etapa do processo

Aciaria

O rendimento energético do aquecimento direto na aciaria foi obtido a partir do estudo de caso de um forno elétrico a arco, conforme Figura 30 e Tabela 111.



Fonte: ALVES, C. P. R. (2017)

Figura 30: Balanço térmico de um forno elétrico a arco

Itens	Entrada	%	Saída	%	Energia útil	Perdas
Energia elétrica	440	64,71%				
Reações químicas	200	29,41%				
Queimadores	40	5,88%				
Perdas elétricas			30	4,41%		30
Produção de Aço			390	57,35%	390	
Gases de exaustão			140	20,59%		140
Água de refrigeração			50	7,35%		50
Escória			55	8,09%		55
Outras perdas			15	2,21%		15
Energia total	680	100%	680	100%	390	290

Fonte: ALVES, C. P. R. (2017)

Tabela 111: Balanço térmico de um forno elétrico a arco, em kwh/t de aço

O rendimento obtido é referente a energia contida produção de aço, no valor de 57,35%

Laminação

Conforme apresentado na seção c.1, o rendimento foi obtido a partir de estudo de Gonçalves (2011), que utilizou um modelo de simulação em tempo real de um forno de reaquecimento de tarugos para laminação para obter uma curva de rendimento (Gráfico 8), com rendimento médio de 30%.

Consolidação das etapas

Para estabelecimento do rendimento médio por fonte e serviço energético foi considerado que os energéticos que participavam da mesma etapa produtiva teriam o mesmo rendimento. Já quando o mesmo energético participa de mais de uma etapa produtiva, o rendimento resultante é calculado através de uma média dos rendimentos por etapa, ponderados pela energia consumida em cada uma delas.

O rendimento para eletricidade no serviço força motriz foi obtido através da média dos motores em diferentes tipos de potência de acordo com o modelo da Weg e para o serviço de iluminação foi utilizado o valor correspondente ao rendimento das lâmpadas com tecnologia LED, conforme divulgado pela referência HTL (s.d).

Conforme a metodologia adotada, as etapas foram alocadas dentro de cada serviço energético conforme item i.2, resultando na Tabela 112:

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	90,00	40,46	-	-	-	-
Carvão	-	-	57,35	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	48,00	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	57,35	-	-	-	-
Eletricidade	96 ,10	-	57,35	-	85,00	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	57,35	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base nas referências de rendimento das etapas produtivas

Tabela 112: Rendimento energético por serviço energético da Rota 3, em %

Coeficientes de destinação

Para estabelecer os coeficientes de destinação foram calculadas as porcentagens de energia a cada uso final conforme apresentado na Tabela 113:

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	3,6	96,4	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	100	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	31,1	-	68,4	-	0,5	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base na metodologia do BEU

Tabela 113: Coeficiente de destinação por serviço energético da Rota 3, em %

5.c4.ii. Condições com tecnologias mais eficientes

5.c4.ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

Para as usinas semi-integradas, ainda que existam algumas alternativas tecnológicas interessantes e que muitas delas são utilizadas há algum tempo pelas empresas, a redução absoluta de consumo de energia e de GEE é significativamente menor. A utilização de plantas semi-integradas para a produção de aço é por si só uma das melhores tecnologias encontradas para a redução do consumo de energéticos e de emissão de GEE. A utilização desta rota tecnológica só não é maior no Brasil porque depende da geração de sucata no país, que está estreitamente relacionada ao crescimento do PIB, ao aumento do consumo de bens intensivos em aço e aumento da obsolescência desses bens (IABr, 2018).

A falta de sucata, gerada internamente, produz um aumento do preço deste insumo que impacta os custos de produção desta rota, levando as empresas a buscarem por rotas alternativas de metálico, como o ferro-gusa sólido, a fim de obter um custo médio melhor no mercado.

Em todos os casos, a intensidade energética pode ser maior do que o simples uso de sucata. Ainda que o aporte de gusa com conteúdo de carbono contribua na eficiência energética do forno elétrico, sendo inclusive uma alternativa de menor emissão de CO₂, outros consumos de energéticos agregados a este material são somados ao conteúdo final.

Em resumo, para se obter os ganhos de eficiência energética que são proporcionados pela rota das usinas semi-integradas é necessário que se possa compatibilizar o crescimento da produção de aço com o retorno da sucata ferrosa que virá como consequência deste crescimento mais permanente.

Uma análise similar à rota integrada foi realizada para as principais alternativas tecnológicas da siderurgia elétrica e utilizou-se a mesma classificação de aplicabilidade definida pelo IABr, conforme apresentado na Tabela 114.

Sigla	Critérios de aceitação
SL	Variáveis específicas locais afetam custos e/ou a aplicabilidade da tecnologia
PO	Tecnologia melhora a eficiência energética/redução de GEE, mas altera e/ou acrescenta a emissão de outros poluentes
TA	Tecnologia já largamente utilizada e com boa penetração
PN	Tecnologia somente aplicável a novas unidades / plantas novas
PI	Tecnologia, cujo processo é imaturo, ou seja, depende de maior pesquisa e maior abrangência de aplicação. Ou ainda não possui referências suficientes que possam atestar sua viabilidade
TE	Tecnologia consolidada e muito especializada, ou seja, apenas aplicável a situações bastante restritas ou depende fortemente de fatores externos, como preços de insumos
LP	Longo Prazo - Tecnologias que apresentam um grau de maturidade elevado, mas são inviáveis, pois possuem um retorno de capital muito longo, sendo muitas vezes inviabilizadas pelo custo de capital e retorno do investimento em relação ao cenário de crescimento projetado

Fonte: IABr (2018)

Tabela 114: Siglas de aplicabilidade das tecnologias

Medidas aplicáveis à aciaria	Critério
Uso de sucata processada	TE
Controle de pressão interna do forno	TA / PI / SL
Aumento do sequenciamento forno-lingotamento	TA / TE / SL
Uso de pneu na carga e outros resíduos com conteúdo de carbono	PO
<i>Drivers</i> de velocidade variável	TA / LP / SL
Escória espumante	TA / SL
Forno elétricos a arco com vazamento a bica excêntrica	TA / SL
Queimadores Oxi-GN	TA / SL
Uso de lanças supersônicas	TA / SL
Pré-aquecimento de sucata	PO / PN
Monitoramento de gases de escape	SL / LP
Tecnologia <i>Near Net Shape</i>	TE

Fonte: Elaboração própria com dados do IABr (2018)

Tabela 115: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de aciaria

Uso de Sucata Processada

A trituração é o processo utilizado para o beneficiamento da sucata. Este processo consiste em inserir as sucatas em trituradores denominados *shredder*, este equipamento trata-se de um moinho de martelos, que fragmenta a sucata e posteriormente efetua a separação da parte ferrosa e não ferrosa do material triturado, originando assim a sucata triturada. As grandes vantagens do uso de sucata triturada nas aciarias são a elevada densidade e o baixo grau de não ferrosos, resultando no aumento do rendimento metálico, dessa forma diminuindo a geração de escórias, o consumo de energéticos e de eletrodos no forno elétrico a arco (SOUZA, E. R., 2015).

De acordo com SOUZA, E. R. (2015), a utilização de 59% de sucata triturada como carga metálica de um forno elétrico pode-se alcançar em termos energéticos, a melhora no rendimento do processo de fusão de 89% para 91%; menor consumo de energia elétrica para cada tonelada de aço produzida (2 MWh/ton); melhor distribuição térmica do forno.

Controle de pressão interna no forno

Além de melhorar a distribuição de temperatura e evitar a entrada de ar frio nas câmaras de combustão, sendo um requisito necessário para o desempenho satisfatório do forno, o controle adequado da pressão interna do forno é um importante fator de segurança para o sistema, uma vez que trabalha a uma pressão superior à pressão atmosférica. Dessa maneira, evita-se a entrada de ar frio dentro do forno, evitando riscos de explosão e incêndio (SARTORI, S. C., SARTORI, J. C., s.d.).

Aumento do sequenciamento forno-lingotamento

Segundo BRETAS, A. M. (2013), "O problema do sequenciamento da produção de aço por lingotamento contínuo ou *"Steelmaking - Continuous Casting Problem"* já foi abordado por alguns autores, mas não há uma uniformidade entre os trabalhos, variando abordagem, objetivo e restrições do problema. Tal problema envolve diversos elementos de alta relevância como custos de parada de máquina e custos de produção dependentes da sequência".

O aumento da eficiência do sequenciamento entre o forno panela e o lingotamento contínuo na aciaria elétrica, reduz o tempo de espera da panela, resultando na redução da perda de calor, diminuição da temperatura, e consequentemente, menor consumo de energia no processo (BRETAS, A. M., 2013). No entanto, não é possível quantificar a redução no consumo de energia de uma forma global, pois dependerá dos tipos de equipamentos utilizados, tanto na aciaria, quanto no lingotamento contínuo.

Uso de pneu na carga ou outros resíduos com conteúdo de carbono

Pneus por apresentarem uma composição rica em carbono e borracha, possui forte potencial na substituição do antracito ou coque usado em fornos elétricos a arco. Além deste, o segundo elemento em quantidades consideráveis no pneu é o ferro das malhas de reforço dos pneus, conhecido como negro de fumo, o que pode funcionar como uma forma adicional de sucata metálica para o forno. O hidrogênio, terceiro elemento em grande quantidade no pneu, não constituirá problema desde que a queima do pneu seja realizada de modo total dentro do forno, caso contrário, esse elemento poderá contaminar o aço líquido e provocar fragilidade no produto siderúrgico final. Outros elementos apresentam quantidades irrelevantes para causar problemas ao processo (GORNÍ, A. A., 2008).

Outro fator importante é que a substituição total ou parcial dos carburantes tradicionais por pneus inservíveis pode trazer consideradas vantagens econômicas ao processo, uma vez que o custo dos carburantes usados nos fornos elétricos a arco pode variar entre 200 a 700 dólares por tonelada, conforme seu rendimento e confiabilidade. Enquanto, pneus usados podem ser obtidos de forma gratuita ou, eventualmente, pode-se conseguir remuneração para seu processamento, aliando aumento de faturamento à redução de gastos com insumos (GORNÍ, A. A., 2008). Adicionalmente ao uso de pneus usados também pode se mencionar a contribuição para o meio ambiente, dado que esses produtos apresentam longo processo de decomposição.

Drivers de velocidade variável

A instalação de *drivers* de velocidade variável nos motores, bombas e ventiladores da unidade de produção que não tem operação contínua, otimiza o consumo de energia elétrica de acordo com as condições demandadas (FUKUOKA, R., 2016).

Escória espumante

A escória espumante garante que o calor do banho líquido não seja perdido pelas paredes do forno elétrico a arco (FEA), mantendo grande parte do calor, consequentemente contribui com a redução de custos de energia. Outro fator importante é que a eficiência

energética do forno é aumentada na ocorrência de uma boa espumação, resultando na diminuição das vibrações causadas pela fusão, na diminuição de som e do consumo de eletrodos. Uma espumação adequada garante que o banho metálico seja coberto, e o caminho feito pela corrente elétrica entre os três eletrodos seja facilitado (VIEIRA, D., ALMEIDA, R. A., BIELEFELDT, W. V., VILELA, A. C., 2015).

Na prática, o aumento do índice de espumação reduz o total de distorção harmônica (THD) entre as fases do FEA. A redução do THD leva a uma redução da energia elétrica consumida na etapa de refino do FEA. A eficiência da escória espumante depende dos teores médios de FeO, MgO e basicidade da escória (VIEIRA, D., ALMEIDA, R. A., BIELEFELDT, W. V., VILELA, A. C., 2015).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia elétrica de 0,07 GJ/ton de aço bruto, com custo alto de US\$ 15,6/ton de aço bruto, e *pay back* em médio prazo de 4,2 anos. Além de uma redução de emissões classificada como média de até 11 kg CO₂/ton de aço bruto (BNDES, 2012).

Fornos elétricos a arco com vazamento a bica excêntrica

Atualmente 70% dos fornos nas indústrias possuem esta configuração. Nesse equipamento, o fundo é alargado na região do furo de vazamento excêntrico e através dele o aço desce em um jato direto, diferentemente dos fornos a bica (REIS, K. C., 2017).

O grande diferencial dessa configuração é que permite um vazamento livre de escória, eliminando a etapa posterior de separação entre o aço e escória. Além de diminuir a perda de temperatura em até 25 °C durante o vazamento, uma vez que o jato cai verticalmente na panela, percorrendo um caminho curto e compacto (REIS, K. C., 2017). Ambas vantagens resultam em economia de energia devido a maior conservação da temperatura, reduzindo a quantidade de combustível que seria utilizado para promover aquecimento posterior às devidas etapas.

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia elétrica de 0,05 GJ/ton de aço bruto, com custo relativamente baixo de US\$ 5,0/ton de aço bruto, e *pay back* em médio prazo de 6,8 anos. Além de uma redução de emissões classificada como média de até 9 kg CO₂/ton de aço bruto (BNDES, 2012).

Queimadores Oxi-GN

Os queimadores oxi-combustível, normalmente, buscam o aumento da produtividade do forno no período de fusão pela energia adicional de combustíveis, neste caso gás natural; O aumento da simetria térmica em fornos de corrente alternada; A melhora energética do período de fusão; E a redução do consumo de energia elétrica (ROSSI, D., 2014).

É importante salientar que esses equipamentos, em geral, são instalados nas paredes dos fornos com o objetivo de acelerar a fusão da sucata, preferencialmente nos pontos frios entre os eletrodos. Os processos de transferência de calor entre a chama do queimador e a sucata ocorre por convecção e irradiação (ROSSI, D., 2014).

No entanto, é necessário fazer um estudo de viabilidade econômica, considerando o investimento para a substituição dos queimadores, o custo do oxigênio e a economia obtida pela redução do consumo de energia elétrica e dos combustíveis.

Por outro lado, dados da literatura informam que a aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia elétrica de 0,14 GJ/ton de aço bruto, com custo médio de US\$ 7,5/ton de aço bruto, e *pay back* em curto prazo de 0,9 ano. Além de uma redução de emissões classificada como alta de até 24 kg CO₂/ton de aço bruto (BNDES, 2012).

Uso de lanças supersônicas

Um dos principais objetivos na injeção de oxigênio através de jatos supersônicos em modo lança é a redução do consumo dos energéticos (ROSSI D., 2014).

Porém esta medida depende de múltiplas variáveis, como *Setup* dos eletrodos no FEA e no forno-panela que determinam o consumo de energia elétrica, a quantidade de injeção do gás natural, quantidade de injeção do coque, porcentagem de gusa na carga, porcentagem de sucata não processada na carga, porcentagem de sucata triturada na carga e outras configurações do processo. Portanto, a estimativa do percentual de redução no consumo dos energéticos necessita de uma análise bastante acurada.

Pré-aquecimento de sucata

O pré-aquecimento da sucata (carga) diminui a quantidade de energia elétrica necessária para fundir a carga no FEA, estima-se uma redução do consumo de energia elétrica em até 50 kWh/ton de aço bruto, com custo de US\$ 7,8/ton de aço bruto, e *pay back* em curto prazo de 8 anos. Uma maneira eficiente desse pré-aquecimento seria através da integração energética utilizando os gases de exaustão do próprio forno elétrico.

Monitoramento de gases de escape

Basicamente todo processo produtivo da indústria siderúrgica é feito com a presença de gases e vapores, principalmente nas etapas de fusão e fundição, operações envolvidas com elevadas temperaturas, proporcionando a exposição dos trabalhadores a diferentes gases nocivos à saúde, mesmo se inalados em baixas concentrações em períodos prolongados (ENESENSES, 2018).

Portanto, existe considerada quantidade de normas nacionais e internacionais destinadas ao monitoramento dos gases na indústria siderúrgica, podendo-se destacar como os principais gases presentes nos processos siderúrgicos a amônia, benzeno, monóxido de carbono, cloreto de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, cianeto de hidrogênio, óxido nítrico, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre, COV e gases combustíveis. Para detecção desses gases há disponíveis no mercado dois modelos de equipamentos para detecção, os detectores de gases fixos (instalados nas linhas produtivas, em áreas mais críticas e passíveis a vazamentos) e os detectores de gases portáteis (utilizados junto aos operadores e demais funcionários da indústria quando estes transitam em locais de risco) (ENESENS, 2018).

Os detectores de gases fixos realizam o monitoramento das concentrações de forma contínua, detectando a presença de gases acima dos limites estabelecidos, com alertas e controles de emergência. E os detectores portáteis devem seguir o estabelecido nas NRs vigentes, podem ser configurados para um ou mais gases presentes nos processos industriais. Para tanto, é aconselhável que projetos detalhados sejam realizados por especialistas da área de detecção (ENENSES, 2018).

Tecnologia *Near Net Shape casting*

Nessa tecnologia, o metal lingotado é diretamente encaminhado ao laminador a quente, sem a necessidade das etapas de resfriamento seguido de reaquecimento para a laminação que ocorre no processo de lingotamento convencional (BNDES, 2012).

Essa tecnologia apresenta uso limitado a alguns formatos de produtos, como placas menos espessas e de laminados de tiras a quente. Entretanto, estima-se que a aplicação dessa medida reduz o consumo de energia da ordem de 5 GJ/ton de aço bruto, com investimento de aproximadamente US\$ 235/ton de aço bruto e *pay-back* em curto prazo estimado em 3,3, anos (BNDES, 2012).

Medidas aplicáveis a Laminação	Critério
Isolamento dos fornos	LP / TE
Cargas aquecidas	SL
Enriquecimento com O ₂	TE
Queimadores regenerativos	LP

Fonte: Elaboração própria com dados do IABr (2018)

Tabela 116: Medidas de eficiência energética para a unidade produtiva de laminação

Isolamento dos fornos

Visando diminuir as perdas térmicas, pode-se utilizar isolamentos térmicos nos fornos. Geralmente são utilizados materiais isolantes térmicos a base de fibras refratárias, pois permitem isolar equipamentos expostos a temperaturas de trabalho que podem variar de 500 a 1700 °C. As razões fundamentais para o emprego destes isolantes é o conjunto de propriedades que as constituem, como baixa condutividade térmica, alta resistência ao choque térmico, alta resiliência e baixa capacidade calorífica. Dessa forma, estes materiais podem ser utilizados tanto como revestimento permanente como também revestimento de trabalho, permitindo a redução do consumo de energia, a redução de gases poluentes, além de permitir requisitos importantes de saúde e segurança, evitando preocupações ocupacionais (SILVA, D. G., VASCONCELLOS, W. L., 2017).

Cargas Aquecidas

Como a laminação é facilitada a altas temperaturas permitindo a diminuição da força a ser aplicada, o pré-aquecimento dos produtos semi-acabados utilizando gases de exaustão dos fornos e queima de outros combustíveis disponíveis, reduz o delta de temperatura (ΔT) necessário para atingir a temperatura requerida para a laminação, visto que se o material é processado próximo a sua temperatura crítica ocorre o amaciamento pronunciado do mesmo após sua deformação, onde denomina-se laminação a quente, e, portanto, reduz o consumo dos combustíveis no forno de reaquecimento de tarugos, placas e blocos (OLIVEIRA, R. S., 2009).

Enriquecimento com O₂

O enriquecimento do ar de combustão com oxigênio com pureza mínima de 95% nos queimadores dos fornos de reaquecimento traz inúmeros benefícios para o processo, como o aumento da eficiência térmica, melhoria das características da chama, redução do volume de gases de exaustão, maior eficiência da transferência de calor, redução de custos com combustíveis, maior flexibilidade do sistema de aquecimento e aumento da produtividade. Este último se deve principalmente ao aumento da transferência de calor por radiação em função da maior temperatura adiabática de chama. Deve-se salientar que, para a segurança do processo, o uso de oxigênio é limitado de forma que o enriquecimento permaneça na faixa de 30% na composição final do ar de combustão.

No entanto, é necessário fazer um estudo de viabilidade econômica, considerando o investimento para a substituição dos queimadores, o custo do oxigênio e a economia obtida pela redução do consumo dos combustíveis (GONÇALVES, E. S. S., 2011).

Queimadores Regenerativos

Os queimadores regenerativos armazenam o gás de combustão em uma matriz cerâmica e, posteriormente, o soltam para o ar que entra. Isto requer queimadores que operem em pares, um extrai o calor do gás de combustão, enquanto o outro faz o aquecimento do ar. Quando adicionado a uma melhor relação ar-combustível e controle da pressão do forno, o consumo de energia é reduzido para a metade, com uma diminuição semelhante na produção de CO₂ e NOX.

Os benefícios de se trabalhar com estes queimadores são (MORRIS, A., 2016):

- Tempos de aquecimento mais rápidos (elevadas temperaturas de chama e taxas de transferência de calor, usando queimadores de alta velocidade);
- Maior eficiência (mais calor disponível por unidade de combustível);
- Diminuição da poluição (menores volumes de escapamento, menor quantidade de NO_x);
- Economia de custo (menor quantidade de combustível é usada e a produtividade é maior).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia elétrica de 0,70 GJ/ton de aço bruto, com custo relativamente baixo de US\$ 3,9/ton de aço bruto, e *pay back* em curto prazo de 1,8 ano.

Medidas Gerais	Critério
Melhorias de Controle de processo	TA / SL
Variação de frequência nas utilidades	LP
Manutenção preventiva	TA / SL
Tecnologia de gestão/programa de eficiência energética	TA / TE

Fonte: Elaboração própria com dados do IABr (2018)

Tabela 117: Medidas gerais de eficiência energética para as usinas semi-integradas

Melhorias de controle de processo

A instalação de instrumentos de medição mais precisos e de um sistema de monitoramento e controle em tempo real do consumo dos energéticos pode reduzir o consumo de energia nos processos de produção de forma satisfatória. Para isso, existem vários equipamentos e *softwares* de medição e controle disponíveis no mercado e, portanto, uma avaliação técnico-econômica deve ser realizada para a escolha do melhor sistema.

Drivers de velocidade variável nas utilidades

A instalação de *drivers* de velocidade variável nos motores, bombas e ventiladores da unidade de produção que não tem operação contínua, otimiza o consumo de energia elétrica de acordo com as condições demandadas (FUKUOKA, R., 2016).

Manutenção Preventiva

O programa estruturado de manutenção preventiva é fundamental para o aumento da produtividade e da eficiência energética, para evitar as paradas não programadas dos principais equipamentos consumidores de energéticos, que normalmente exigem repartida para a operação, consumindo muito mais energia no *startup*. Além disso, a manutenção preventiva proporciona a manutenção ou substituição de motores, bombas, compressores, filtros, equipamentos elétricos e outros, quando estão apresentando baixo rendimento e, portanto, desperdiçando energia.

Tecnologia de gestão/programa de eficiência energética

A implementação do programa de eficiência energética requer o planejamento detalhado e a definição de metas de otimização e redução do consumo de energia por cada etapa do processo. Além disso, é necessário implementar um controle do processo eficiente e estruturar uma equipe para identificar, propor e detalhar os projetos, incluindo os estudos de viabilidade técnico-econômica. Uma boa opção é a certificação na Norma ISO-50001, que permite a revisão e melhoria de todos os processos de forma estruturada e documentada. Os resultados obtidos através de um programa de eficiência energética irão variar conforme o nível de atualização tecnológica das usinas e da maturidade em relação à conscientização sobre o consumo eficiente de energia.

5.c4.ii.2) Indicadores Energéticos

Consumo específico

Conforme a grande complexidade e inúmeras variáveis envolvidas na análise e avaliação da implementação de tecnologias alternativas, foi necessário fazer estimativas baseadas na experiência do consultor em metas de redução do consumo dos energéticos e aumento da produtividade do setor. Nessas estimativas é preciso atentar-se que não foram considerados estudos de pré-viabilidade necessários para desenvolver cada uma dessas medidas.

Dessa forma, como foi demonstrado na descrição das medidas de eficiência energética no item anterior, a estimativa da redução do consumo dos principais energéticos refere-se a testes em equipamentos específicos e, para esse estudo, esses testes serão generalizados para todo o subsegmento das indústrias semi-integradas de aço.

É importante lembrar que foram utilizados dados teóricos da literatura, que no momento são os mais atualizados, mas no futuro podem ser modificados, e por isso vir a alterar o perfil de eficiência energética do segmento.

Desse modo, para o estabelecimento do consumo específico melhorado e do rendimento melhorado foram selecionadas as medidas aplicáveis a equipamentos, relacionadas a primeira transformação, conforme os conceitos de rendimento do BEU. A seguir será apresentada a estimativa do consumo específico de cada etapa do processo de produção de aço.

Aciaria

Na Tabela 118, são listados as medidas e o potencial de redução do consumo elétrico e térmico no processo de aciaria.

Medidas aplicáveis à aciaria	Economia elétrica (GJ/ton de aço bruto)	Economia térmica (GJ/ton de aço bruto)
Processos de automação e controle com uso de redes neurais	0,11	desprezível
Transformadores de ultra-alta-potência	0,06	desprezível
Uso de escória espumante	0,07	desprezível
Preaquecimento de sucata	0,19	0,03
Drivers de velocidade variável	0,05	0,01
Total de economia considerada	0,531	0,039

Fonte: Fontes: Elaboração própria com base em BNDES (2012)

Tabela 118: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 3

Conforme as medidas apresentadas, a Tabela 119 apresenta o consumo específico atual, melhorado e o potencial de economia para etapa de aciaria.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
CE atual	5,271	0,861	6,132
CE melhorado	4,740	0,822	5,562
Potencial	0,531	0,039	0,031
% melhoria	10,07%	4,57%	9,30%

Fonte: Elaboração própria baseada nos dados do IABr e BNDES (2012)
Tabela 119: Consumo específico da etapa de aciaria da Rota 3

Laminação

Na Tabela 120, são listados as medidas e o potencial de redução do consumo elétrico e térmico no processo de laminação.

Medidas aplicáveis à Laminação	Economia elétrica (GJ/ton de aço bruto)	Economia térmica (GJ/ton de aço bruto)
Sistemas de monitoramento automático e de metas em laminadores a frio	desprezível	0,21
Total de economia considerada	0,006*	0,21

*Inclui o potencial relacionado a força motriz e iluminação.

Fontes: Elaboração própria com base em BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 120: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 3

Conforme as medidas apresentadas, a Tabela 121 apresenta o consumo específico atual, melhorado e o potencial de economia para etapa de laminação.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
Atual	0,989	1,114	2,103
CE melhorado	0,983	0,904	1,687
Potencial	0,006	0,210	0,416
% melhoria	0,62%	18,85%	10,28%

Fonte: Elaboração própria baseada nos dados do IABr e BNDES (2012)
Tabela 121: Consumo específico da etapa de laminação da Rota 3

Outros total

Na etapa de outros total foram considerados os consumos de energia relacionados à equipamentos térmicos para acondicionamento de sucata, bombeamento de água, transportadores mecânicos, equipamentos de ar comprimido, acionamentos hidráulicos,

torres de resfriamento de água. Por isso, foram adotadas medidas térmicas e elétricas nos serviços energéticos correspondentes ao calor de processo e força motriz.

Medidas aplicáveis a outros total	Economia elétrica (GJ/ton de aço bruto)	Economia térmica (GJ/ton de aço bruto)
Melhorias de controle de processo**	NA	NA
Manutenção preventiva**	NA	NA
Tecnologia de gestão/programa de eficiência energética**	NA	NA
Total de economia considerada	0,003*	0,003*

*Inclui potencial de força motriz, iluminação e aquecimento direto.

** Não foi possível obter indicadores por empresas nesse estudo para aplicação dessas medidas.

Fontes: Elaboração própria com base em BNDES (2012), WEG (2018) e HTL (s.d)

Tabela 122: Economia de energia de acordo com aplicação das tecnologias mais eficientes da Rota 3

Conforme as medidas apresentadas, a Tabela 123 apresenta o consumo específico atual, melhorado e o potencial de economia para a etapa de processos denominados outros total.

Itens	Elétrico	Térmico	Total
	GJ/t de aço	GJ/t de aço	GJ/t de aço
Atual	1,448	0,072	1,520
CE melhorado	1,439	0,069	1,508
Potencial	0,003	0,003	0,416
% melhoria	0,62%	3,96%	0,78%

Fonte: elaboração própria baseada nos dados do IABr E BNDES (2012)

Tabela 123: Consumo específico da etapa de outros total da Rota 3

Consolidado

Considerando o tratamento de dados do item ii.2, o consumo específico final melhorado é de 8,757 GJ/ton de aço bruto.

Rendimentos energéticos

O rendimento melhorado por etapa foi calculado a partir do rendimento atual e aplicando o potencial de economia das medidas relacionadas à primeira transformação de energia, apresentado no item anterior (consumo específico). Foi utilizado o rendimento melhorado de cada etapa para todas as respectivas fontes térmicas. Por fim, o rendimento melhorado de cada fonte por serviço energético foi obtido ponderando-se o rendimento de cada etapa pelo consumo da fonte em cada etapa.

Formas de energia	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	94,00	45,82	-	-	-	-
Carvão	-	-	60,10	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	45,00	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	60,10	-	-	-	-
Elettricidade	96,1	-	63,77	-	85,0	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	60,10	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base nas referências de rendimento das etapas produtivas

Tabela 124: Rendimento energético por serviço energético, em %

Coeficiente de destinação

Na Tabela 125 são apresentados os coeficientes de destinação da Rota 3, que faz referência às porcentagens que são destinadas a cada uso final da energia, para a situação com tecnologias mais eficientes.

Formas de energia	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	-	3,9	96,1	-	-	-	-	100,0
Carvão	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	100,0	-	-	-	-	-	-	100,0
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	33,3	-	66,2	-	0,5	-	-	100,0
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	100,0	-	-	-	-	100,0
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base nas referências de rendimento das etapas produtivas

Tabela 125: Rendimento energético por serviço energético, em %

Investimentos necessários para implantação de medidas básicas de eficiência.

As tabelas a seguir apresentam as medidas de eficiência energética identificadas para o segmento de produção de aço via plantas semi-integradas. Para cada medida são apresentados os custos para reposição do equipamento atual (quando aplicável), o custo do equipamento eficiente, o percentual de economia de energia e economia por energia de matéria-prima (aço bruto) consumido.

As opções indicadas como medidas para a etapa de aciaria são apresentadas na Tabela 126, segundo investimento, potencial de economia e redução de emissões.

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO (US\$/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (GJ/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ton de aço)	Pay back (anos)
Drivers de velocidade variável	2,00	0,06	0,001	2,5
Escória espumante	15,60	0,07	0,002	4,2
Forno elétricos a arco com vazamento a bica excêntrica	5,00	0,05	0,001	6,8
Queimadores Oxi-GN	7,50	0,14	0,003	0,9
Pré-aquecimento de sucata	7,80	0,22	0,005	7,8
Monitoramento de gases de escape	3,10	0,05	0,001	4,3
Tecnologia <i>Near Net Shape</i>	235,00	3,50	0,084	3,3

Fonte: BNDES (2012)

Tabela 126: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência para etapa de aciaria

As opções indicadas como medidas para a etapa de laminação são apresentadas na Tabela 127, segundo investimento, potencial de economia e redução de emissões.

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO (US\$/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (GJ/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ton de aço)	Pay back (anos)
Isolamento dos fornos	15,60	0,16	0,004	31,00
Cargas aquecidas	23,50	0,06	0,001	5,90
Queimadores regenerativos	3,90	0,70	ND	1,80

Fonte: BNDES (2012)

Tabela 127: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência para etapa de laminação

As opções indicadas como medidas gerais de processo são apresentadas na Tabela 128, segundo investimento, potencial de economia e redução de emissões.

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO (US\$/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (GJ/ton de aço)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ton de aço)	Pay back (anos)
Manutenção preventiva	0,02	0,49	0,012	1,00

Fonte: BNDES (2012)

Tabela 128: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência para as usinas semi-integradas

Potencial de eficiência

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas, nota-se o potencial total de 7,86%, impulsionado pelas medidas de melhora nos sistemas térmicos e elétricos, conforme Tabela 129. O potencial foi calculado considerando a diferença entre o rendimento atual e o melhorado, consumo específico e os coeficientes de destinação.

Fonte de energia (GJ/t)	Força motriz	Calor de Processo	Aquecimento direto	Iluminação	Total (%)
Gás Natural	-	0,0029	0,2108	-	11,42%
Carvão	-	-	0,0013	-	4,57%
Coque Metalúrgico	-	-	0,0063	-	4,57%
Óleo Diesel	-	-	-	-	0,00%
Energia Elétrica	0,0148	-	0,5307	-	7,08%
Outras f. Sec. Petr.			0,0013		4,57%
Total (%)	0,62%	4,26%	10,34%	0,00%	7,86%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 129: Potencial de economia do segmento de aço referente a Rota 3

6. ANÁLISE DE CONDICIONANTES À PENETRAÇÃO DE TECNOLOGIAS EFICIENTES DE ENERGIA POR SUBSEGMENTO

Os condicionantes para a implementação de tecnologias eficientes de energia nos subsegmentos considerados da cadeia siderúrgica correspondem aos aspectos técnicos, econômicos e de mercado. O aspecto técnico compreende ao avanço tecnológico das medidas que podem ser implementadas a fim de contribuir para que os processos produtivos sejam energeticamente mais eficientes. O aspecto econômico reflete a lucratividade da troca valorada em períodos de amortização das medidas propostas. E o aspecto de mercado reflete a disponibilidade real para a aplicação das medidas, já que algumas delas encontram-se em processo investigativo ou são desconhecidas para o meio.

Abaixo são relacionados alguns aspectos gerais para todos os subsegmentos da cadeia siderúrgica:

- O investimento nas tecnologias mais eficientes deve ser pago com a redução do consumo dos principais energéticos na cadeia de produção, com o aumento do rendimento dos principais equipamentos e, preferencialmente, evitando-se custo pela substituição da energia elétrica ou térmica comprada no mercado.
- A avaliação econômico-financeira das medidas de investimentos propostas para eficiência energética deve ser feita através do fluxo de caixa, com parâmetros estabelecidos de acordo com uma análise econômica para avaliar e determinar a TIR (Taxa Interna de Retorno), no caso de investimentos e tempo de retorno maiores.
- Embora os projetos tenham impactos ambientais positivos, já que reduzem o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa, para algumas medidas pode ser necessário o licenciamento ambiental, que poderá constituir-se em um obstáculo com relação ao cronograma de implementação e eventualmente, no aumento dos investimentos necessários devido às medidas de mitigação.
- Um sistema automatizado de medição e controle do consumo dos energéticos é fundamental para a correta avaliação da eficiência dos equipamentos e processos. Somente através desta ferramenta será possível avaliar os resultados e corrigir os parâmetros operacionais, razão pela qual a implementação ou melhora nos programas de gestão energética são necessárias, e podem ser seguidas sob a norma ISO 50001.
- Recomenda-se a aplicação e certificação na norma ABNT NBR ISO 50001, que tem como característica destaque a introdução do “desempenho energético”, conceito mais amplo que eficiência energética, incorporando também o uso e o consumo de energia, relacionados aos usos finais dados a energia e as fontes de energia utilizadas. Essa norma permite uma visão geral e completa do balanço energético, não somente com relação ao consumo de energia, mas também com relação ao consumo das matérias-primas e a eficiência operacional.

- A contratação e formação de profissionais capacitados na gestão de energia, é um ponto favorável, pois eles podem atuar tanto em projetos, garantindo que as tecnologias mais eficientes sejam utilizadas, quanto na operação auxiliando no uso dessas tecnologias.
- Hoje, as indústrias que desejam modernizar os motores instalados em suas linhas de produção têm a sua disposição recursos competitivos de várias fontes para esse fim. Os empreendedores têm em mãos soluções desenhadas por consultores de energia e empresas de eficiência energética, além de linhas de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) ou chamadas públicas de distribuidoras de energia. Além disso, os fabricantes de máquinas mantêm planos de troca de motores elétricos, concedendo descontos de até 12% no valor de aquisição do novo motor na entrega do equipamento antigo.

6.a. Subsegmento Pelotização

6.a.i. Condicionantes técnicos

As medidas de eficiência energética e atualização de tecnologia poderão ocorrer em todas as etapas do processo produtivo integrado da pelletização, desde a mina até o carregamento das pelotas.

No caso da energia elétrica, as melhorias devem ser focadas no aumento do rendimento médio dos motores elétricos. As principais condições para realizar a substituição devem ser avaliadas através dos seguintes fatores, após a identificação dos motores antigos em operação: horas em operação, vida útil média, sequências de manutenção corretiva e respectivos custos. Isto permite estabelecer o plano de troca por motores de alta eficiência.

Além desta medida, diferentes tecnologias estão sendo avaliadas para melhorar a eficiência de cada etapa do processo produtivo integrado e as principais condições são: a disponibilidade da tecnologia no mercado, resultados em outras usinas, viabilidade da adaptação destas tecnologias aos processos existentes, estimativas que viabilizem a adequação sobre a redução do consumo de energia e matérias-primas, tendo em conta o aumento da produtividade.

6.a.ii. Condicionantes econômico-financeiros

A avaliação dos projetos de atualização tecnológica e de eficiência energética encontram-se na fase conceitual e, portanto, os custos relacionados foram estimados ou fornecidos na planta.

Os principais condicionantes econômico-financeiros são: o desenvolvimento de estudos de viabilidade até a fase de detalhamento da engenharia e pré-execução dos projetos, estimativa mais precisa do investimento em cada um dos projetos ($\pm 15\%$), cronograma

detalhado de execução, confirmação dos rendimentos estimados em produtividade e eficiência energética, disponibilidade de capital e fontes de financiamento.

6.b. Subsegmento Produção de Gusa

6.b.i. Condicionantes técnicos

As principais medidas de eficiência energética para este subsegmento estão relacionadas a redução do consumo do principal energético, o carvão vegetal, que resulta no desempenho energético do alto-forno, refletida pela otimização dos consumos específicos dos energéticos térmicos utilizados.

Em relação à energia elétrica, as principais oportunidades são a substituição de motores antigos por motores de alto rendimento e no sistema de iluminação para lâmpadas de tecnologia LED, além de ações de gestão adequadas.

Entre as oportunidades para melhoria do consumo da energia térmica, destaca-se a melhoria do rendimento das caldeiras de vapor para aumentar a eficiência da energia térmica na cogeração (Usina termelétrica, UTE) e não no processo em si.

Vale a pena mencionar que durante as visitas, foram indicadas várias medidas que poderiam ser tomadas para redução do consumo do carvão vegetal, com a consequente redução do custo final de produção de ferro-gusa. No entanto, estas medidas não foram testadas ainda e muitas encontram-se em fase de estudo de viabilidade.

Adicionalmente, as empresas produtoras de gusa operam com margens de lucro muito estreitas, o que dificulta a implementação de projetos de eficiência energética, que em muitos casos tem uma amortização de longo prazo.

6.b.ii. Condicionantes econômico-financeiros

A maioria das plantas produtoras de gusa já tem instalada a cogeração com a utilização do combustível gás de alto-forno (UTE). As empresas que ainda não investiram na cogeração ou pretendem modernizar seus equipamentos, deverão avaliar os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE, elaborados pela ANEEL, onde constam as regras e diretrizes básicas para os projetos de eficiência energética, assim como os estímulos à auto geração e à geração a partir de fontes incentivadas.

Existem projetos especiais que podem ser enquadrados de acordo com critérios que tragam benefícios à concessionária de distribuição onde a planta está conectada, além da comprovação da redução do consumo de energia elétrica, em benefício dos demais consumidores da região.

6.c. Subsegmento Produção de Aço via plantas integradas

6.c.i. Condicionantes técnicos

As medidas de eficiência energética e atualizações de tecnologia irão ocorrer em todas as etapas do processo de produção do aço, tendo em vista as duas rotas principais estabelecidas com agentes redutores: coque ou carvão vegetal.

Para a consideração dos condicionantes relacionados a medidas de eficiência térmica tem-se em conta as principais etapas de processo, como a redução, refino e laminação. Tanto para a Rota 1 quanto para a Rota 2, a redução é efetuada pelo alto-forno e a tendência tecnológica é manter este processo por algum tempo, já que os novos processos de redução envolveriam também investimentos nas trocas da infraestrutura atual, razão pela qual a tendência é aumentar a eficiência energética na tecnologia existente.

Possivelmente, projetos com novas tecnologias são desenvolvidos em empresas de forma paralela às tecnologias já existentes, ou para plantas novas onde se reduz os custos de infraestrutura, porém nesse relatório será focado nas melhorias dos processos já em operação.

Para as condições atuais, busca-se a difusão de tecnologias que já foram implementadas por outras empresas, o qual assegura sua viabilidade e êxito.

Atualmente no Brasil, utilizam-se principalmente 3 rotas tecnológicas (plantas integradas que utilizam coque ou carvão vegetal e plantas semi-integradas) para a produção de aço. Para as duas primeiras, a diferença está na matéria-prima utilizada no alto-forno, na etapa de redução, comparando essas duas rotas as plantas que utilizam coque predominam em relação as que utilizam carvão vegetal. É importante ressaltar que as plantas de coque representam 80-85% do consumo de energia do setor. Já em relação a terceira rota, que corresponde a plantas semi-integradas, a aciaria elétrica representa 70-75% da energia consumida nesse tipo de plantas (CGEE, 2010).

As plantas integradas seja a Rota 1 ou 2 possuem uma variedade de opções tecnológicas de reduzir o consumo de energia, que poderão depender do comportamento do mercado da indústria siderúrgica. A energia faz parte do aumento da produtividade das empresas e esta, por sua vez, está correlacionada para melhorar o consumo específico dos energéticos dependendo da rota estabelecida.

Os consumos de energia são maiores em usinas que empregam coque na redução e fornos LD no refino, por estes motivos as opções tecnológicas estão focadas em melhorar a eficiência térmica do processo no alto-forno através das medidas a seguir:

- Redução do consumo de coque ou carvão vegetal de acordo com a rota, por aumento na injeção de carvão pulverizado (PCI);
- Aumentar o uso do gás natural no processo de combustão para reduzir os energéticos atualmente utilizados;
- Aproveitar os gases do alto-forno para geração de energia mediante o uso da turbina de topo;

- Automatização do processo de pré-aquecimento do ar de injeção;
- Recuperação de calor nos regeneradores;
- Melhoras do sistema de automatização e controle no alto-forno.

No processo de refino em plantas integradas utilizam o forno de oxigênio LD, o qual requer maior controle para sua operação pela injeção dos gases e as reações térmicas que ocorrem.

Para o forno LD, as medidas tecnológicas propostas estão focadas em:

- Recuperar o calor sensível dos gases do forno;
- Adotar ventiladores com controle de velocidade variável;
- Melhorar o processo de controle e monitoramento.

Para a laminação, há uma série de medidas que correspondem ao tipo de laminação a ser feita, mas em termos gerais, pode-se destacar as medidas a seguir:

- Integração entre o lingotamento e a laminação a quente, processo conhecido como “Near Net Shape” para perfis, o qual evita o uso de fornos de reaquecimento na laminação;
- Controle de processo em laminadores de peças a quente;
- Recuperação de calor nos fornos das linhas de tratamento térmico;
- Recuperação de calor da água de resfriamento do LTQ para uso em geração de vapor;
- Sistemas de monitoramento automático em laminadores a frio.

Do ponto de vista ambiental, sabendo-se que o carvão vegetal é uma alternativa utilizada no Brasil, por razões de disponibilidade de recursos vegetais, existe a potencialidade de melhorar este recurso de biomassa, através da estruturação de programas que levam ao uso adequado dos recursos florestais mediante a seleção de áreas que aumentam o plantio de eucaliptos, buscando reduzir o consumo de espécies nativas (CGEE, 2010).

Tecnologicamente, os esforços devem ser focados na redução do consumo de energia no alto-forno, seja de coque ou carvão vegetal, além da substituição de energéticos de maior contaminação por gás natural e no aproveitamento dos gases do alto-forno para geração de energia por meio da turbina de topo.

6.c.ii. Condicionantes econômico-financeiros

A viabilidade dos projetos tecnológicos propostos irá depender de condicionantes econômicos e financeiros. Paralelamente aos estudos de viabilidade técnica e à fase de detalhamento da engenharia, é necessário o desenvolvimento de estudos econômicos com ênfase nos custos de investimento, afim de ter um CAPEX com nível razoável de incertezas. Para cada projeto proposto deve-se estabelecer um estudo financeiro, o qual contempla seu fluxo de caixa, as fontes de financiamento e os benefícios esperados economicamente.

6.d. Subsegmento produção de aço via plantas integradas que reaproveitam sucata

6.d.i. Condicionantes técnicos

Nesse subsegmento, a maior condicionante técnica é a disponibilidade da matéria-prima, sucata, já que esta alternativa reduz o consumo de energia por tonelada processada a mais da metade do consumido nas plantas integradas pelas Rota 1 e 2. Outros condicionantes técnicos para a Rota 3 estão relacionados ao processo de refino.

Nas plantas semi-integradas, o consumo de energia no forno representa de 70 a 75% da energia da aciaria (CGEE, 2010). No capítulo 5 estão relacionadas as medidas que contribuem para a redução desse consumo de energia tanto para o forno elétrico a arco quanto para os processos de laminação.

As principais medidas para aumentar a eficiência energética no forno elétrico estão apresentadas a seguir:

- Melhora do processo de controle;
- Transformadores de ultra alta potência;
- Injeção de gás inerte para aumento da transferência de calor;
- Uso de fornos a arco elétrico em corrente DC;
- Uso de escória espumante;
- Pré-aquecimento da sucata;
- Controle dos ventiladores dos gases de combustão.

Neste caso, as medidas de economia estão centradas no forno elétrico que é o equipamento principal para as plantas semi-integradas, embora o consumo em uma planta semi-integrada seja menos que a metade de uma planta integrada. Estas medidas contribuem para a redução do consumo específico da energia elétrica por tonelada de aço produzida.

6.d.ii. Condicionantes econômico-financeiros

A viabilidade dos projetos tecnológicos propostos irá depender de condicionantes econômicos e financeiros. Paralelamente aos estudos de viabilidade técnica e à fase de detalhamento da engenharia, é necessário o desenvolvimento de estudos econômicos com ênfase nos custos de investimento, afim de ter um orçamento de $\pm 5\%$. Para cada projeto proposto deve-se estabelecer um estudo financeiro, o qual contempla seu fluxo de caixa, as fontes de financiamento e os benefícios esperados economicamente.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir das informações recebidas das empresas visitadas e também das empresas associadas ao Instituto Aço Brasil, pode-se afirmar que o setor siderúrgico, em todos os seus subsegmentos, está buscando alternativas para consumo dos energéticos de forma mais eficiente a fim de aumentar a competitividade do setor, pois uma parcela significativa dos produtos siderúrgicos produzidos no Brasil é exportada para outros países.

É importante ressaltar que o setor siderúrgico brasileiro ainda não se recuperou da maior crise da sua história, ocorrida nos últimos quatro anos, o que reduz consideravelmente o potencial de retomada do setor pela demanda interna. Somado a isso, no cenário externo há um excesso de capacidade de produção de aço bruto de 700 milhões de toneladas. Desse total, 405 milhões de toneladas são originados da China (SICETEL, 2016).

A combinação destes dois fatores reduz as possibilidades de investimento dada a alta ociosidade do parque fabril brasileiro.

A produção mundial de aço, atualmente, está em torno de 1,6 bilhão de toneladas/ano. O Brasil produziu, no último ano, 31 milhões de toneladas, o que corresponde a 1,9% da produção mundial, mesmo sendo o nono maior produtor global. Isso demonstra a diferença de escala existente entre os grandes produtores de aço. É importante ressaltar que, apenas os cinco primeiros países produtores de aço representam 70% da produção de aço mundial (SICETEL, 2016).

Em função destes fatos, quando analisamos as medidas tecnológicas com potencial de produzir ganhos em eficiência energética e de mitigação de gases do efeito estufa, a questão torna-se mais complexa de ser respondida, pois depende não somente dos critérios técnicos e operacionais, mas também de outros requisitos a serem considerados, principalmente no que se refere ao crescimento da produção atual, ao uso da capacidade instalada, ao equilíbrio dos mercados interno e externo, que possam incentivar e sustentar os investimentos em tecnologias mais atualizadas e simultaneamente alcançar os níveis de competitividade necessários à manutenção e desenvolvimento da produtividade do setor.

- Produção de Gusa

Embora sejam empresas de pequeno e médio porte, os produtores de gusa estão conscientes da importância do máximo aproveitamento energético, para a redução dos custos de produção em um mercado extremamente volátil e com margens apertadas.

Para as plantas dedicadas a produção de gusa, o consumo térmico corresponde a 98,5%, enquanto o elétrico corresponde a 1,5%. O carvão vegetal representa 69,6% do consumo total de energia. Os indicadores atuais de consumo específico são: eletricidade de 0,009 tep/ton de gusa (107,kWh/ton de gusa) e energia térmica de 0,527 tep/ton de gusa (5.270.000 kcal/ton de gusa).

Com a implementação das medidas propostas, consegue-se uma economia total de 22,95% da energia consumida dos energéticos, sendo as medidas referentes ao gás de alto-forno as de maior impacto.

- Produção de Pelotas

O subsegmento de pelletização tem três etapas básicas: Preparo das matérias-primas (mineral, fundentes, aglomerados), formação de pelotas cruas e o processamento térmico. Para as duas primeiras etapas, o consumo relevante é elétrico, e para a terceira etapa é térmico, sendo este consumido no forno onde são queimadas as pelotas.

O consumo específico elétrico no subsegmento de pelletização foi valorado em 0,0070 tep/tms (81,46 kWh/tms) e o consumo específico térmico em 0,0212 tep/tms (212.046 kcal/tms).

Com a implementação das medidas propostas consegue-se uma economia de 1,91% do consumo de energia elétrica e de 10,6% do consumo de energia térmica.

- Produção de Aço

Para produção de aço via plantas integradas são consideradas duas rotas; a Rota 1 que corresponde a plantas que possuem coqueria e a Rota 2 plantas que não possuem coqueria, e produzem a partir do carvão vegetal ou do coque. Por outro lado, a Rota 3 é referente as plantas semi-integradas que utilizam como matéria-prima, preferencialmente, a sucata.

Para as Rotas 1 e 2, a matriz energética é bastante diversificada e complexa, sendo parte dos energéticos adquiridos no mercado e outra parte produzida dentro das próprias usinas, possibilitando a reutilização em diferentes processos.

O consumo de energia para a Rota 1, considerando as etapas de transformação e unidades de serviço e é de 24,9 GJ/ton de aço bruto e a produção energética desta rota é de 6,29 GJ/ton.

O consumo final para a produção de aço pela Rota 1, sob as condições atuais, foi quantificado em 18,61 GJ/ton de aço bruto. A distribuição de energia para a Rota 1 é de 11,49% de energia elétrica e 88,51% de energia térmica. Enquanto o consumo final de energia sob condições melhoradas, sem considerar os centros de transformação, é de 16,71 GJ/ton de aço bruto e o potencial de economia com as medidas propostas para a Rota 1 foi estabelecido em 10,54%.

A Rota 2, que corresponde a usinas integradas sem coque próprio, foi analisada sob dois cenários: um considerando as usinas que operam somente com carvão vegetal e um outro cenário de usinas que utilizam carvão mineral / coque metalúrgico, mas não processam coque.

Analisando somente a Rota 2 com uso de carvão vegetal, o consumo final de energia para estas usinas é de 18,07 GJ/ton de aço bruto, tendo uma distribuição do consumo de 27,32% para consumo elétrico e 72,67% para consumo térmico. E a análise somente as plantas com uso de carvão mineral e coque metalúrgico (sem coqueria), apresentam o consumo de energia de 16,36GJ/ton de aço bruto, sem considerar centros de transformação. Para esta situação, a distribuição do consumo é de 30,58% em energia elétrica e 69,42% de energia térmica. O potencial de economia para a Rota 2, com carvão vegetal, ao implementar as medidas de economia é de 10,32%, para o cenário de Rota 2, coque metalúrgico, o potencial de economia é de 10,50%.

As iniciativas das usinas integradas em relação à atualização tecnológica e de eficiência energética, têm se concentrado em reduzir o consumo dos energéticos de carvão, através da redução do "fuel rate" nos altos-fornos, maior eficiência nos equipamentos de coqueificação e sinterização e o máximo do aproveitamento da energia latente disponível nos gases de processo, para diversas aplicações e também a utilização destes gases para a auto geração de energia elétrica.

Para a Rota 3, correspondente a usinas semi-integradas, o consumo de energia é de 9,755 GJ/ton de aço bruto, com uma distribuição de 79,02% de energia elétrica e 20,98% de energia térmica. O consumo específico melhorado que se consegue ao implementar as medidas propostas é de 8,957 GJ/ton de aço bruto e o potencial de economia para os energéticos utilizados de 7,86%, sendo a eletricidade o energético mais importante.

É importante ressaltar que nas plantas semi-integradas, a matriz energética é completamente diferente. As principais fontes energéticas são a energia elétrica e o gás natural, que correspondem a 79% e 16%, respectivamente, do consumo total de energéticos.

O potencial apresentado para cada Rota é uma estimativa média para o setor, e apresenta limitações como a falta de conhecimento de quais medidas já são aplicadas em cada planta. A aplicabilidade e viabilidade técnica e econômica das medidas pode variar em função de especificidades de cada projeto/medida.

As principais atualizações tecnológicas e programas de eficiência energética são concentrados na melhora dos processos da aciaria, principalmente no forno elétrico a arco e no melhor aproveitamento da energia térmica na laminação, principalmente nos fornos de reaquecimento.

De modo geral, no nível operativo, a principal recomendação é que as empresas façam um investimento para a certificação na norma ABNT NBR ISO 50001, não somente para obtenção do certificado, mas principalmente como uma oportunidade de avaliar seus processos detalhadamente e implementar programas que podem melhorar o uso dos energéticos, com a consequente redução do custo final de produção.

Os resultados esperados da aplicação nas empresas da norma de gestão de energia são:

- Administrar ativamente o uso de energia e reduzir a exposição a seus custos crescentes;
- Melhorar continuamente a intensidade energética (uso da energia/produto);
- Arquivar documentos para uso interno e externo (créditos por emissões, por exemplo);
- Utilizar o pessoal e os recursos da empresa de maneira inteligente e reduzir as emissões sem um efeito negativo nas operações.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABM, 1997 - Associação Brasileira De Metalurgia, Materiais E Mineração - Padrões de Balanço Energético Global. São Paulo. 99 p.

ANEEL, 2015 - Agencia Nacional de Energia Elétrica - Máximo Luiz Pompermayer, Superintendente - *Fórum sobre eficiência energética e geração distribuída* - Brasília - DF

ALACERO, 2016 - *Asociación latinoamericana del acero* - Acesso em 2018, disponível em: https://www.alacero.org/sites/default/files/revista/acero_latinoamericano_-_noviembre-diciembre_2016.pdf

ALACERO, 2017 - *Asociación latinoamericana del acero* - Acesso em 2018, disponível em: https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/america_latina_en_cifras_2017.pdf

Alto Horno Balance de Masa y Energetico, s.d. - Acesso em 2018, disponível em: <https://pt.scribd.com/document/258418749/Alto-Horno-Balance-de-Masa-y-Energetico>

ALVES, C. P. R. 2017 - *Estudo da eficiência energética em um forno elétrico a arco* - Viçosa, 2017 - Disponível em: https://www3.dti.ufv.br/sig_del/consultar/download/347

ABAL, s.d. - Associação brasileira do alumínio - Acesso em 2018, disponível em: <http://abal.org.br/>

AURÉLIO, 2010 - *Metalurgia do ferro e do aço* - Acesso em 2018, disponível em: https://pt.slideshare.net/ABIFA_CCA/todo-o-processo-de-fabricao-de-ao-e-ferro

BARROS, J. L. M., PATTO, R. P., GANDRA, P. V. S., 2015 - *Aumento da eficiência energética com o pré-aquecimento do ar e do gás através da recuperação do calor dos gases de exaustão dos regeneradores do alto forno* - Abm week

BATISTA, A. A. M., 2009 - *Utilização do gás de alto-forno para produção de energia na indústria siderúrgica de Minas Gerais*, 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto

BEN, 2017 - *Balanço Energético Nacional, EPE* - Acesso em 2018, disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>

BEU, 2005 - Ministério de Minas e Energia. *Balanço de Energia Útil BEU* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.politecnica.pucrs.br/~eberson/Balan%20E70%20de%20Energia%20%20DAtil%202005.pdf>

BICALHO, R. M., MIRANDA, E. S., SOUZA, C. C., FORTES, G. M., DAMASCENO, E. C., & SILVA, J. C., 2008 - *Redução de entrada de ar falso no sistema de exaustão da máquina de sínter* - Tecnologia em Metalurgia e Materiais

BNDES, 2012 - *Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade* - BNDES Setorial 41, p. 181-236 - Acesso em 2018, disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4287/2/BS%2041%20Sustentabilidade%20da%20siderurgia%20brasileira_.pdf

BRETAS, A. M., 2013 - *Modelagem do Sequenciamento no Processo de Lingotamento Contínuo por Métodos Exatos e Heurísticos*. - Acesso em 2018, disponível em: http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-9NSJTK/dissertacao_allan.pdf?sequence=1

CANDIDO, M. R., s.d. - Fornos a arco - Apêndice A - Acesso em 2018, disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-09022009-181024/publico/TeseMarcosCandidoApendiceA_Fornoarco_PosicaoBrasil_.pdf

CARÁ, J. A., 2013 - *UFPR – Curso de Arquitetura e Urbanismo* – Disciplina de Materiais de Construção - Acesso em 2018, disponível em: http://www.cau.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2013/11/2.1-LucasCara_JoseAugustoFaria_ProdA%C3%A7o.pdf

CARDOSO, C. G., 2016 - *Desenvolvimento e caracterização de sinter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos para aplicação em aciaria* - Volta Redonda, RJ.

CARVALHO, P. S., MESQUITA, P. P., ARAÚJO, E. D., 2018 - *Sustentabilidade da Siderurgia Brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade*

CETEC, 2011 - *10º Seminário e exposição de instrumentação, sistemas, elétrica e automação*, 2011. CETEC

CGEE, 2010 - *Siderurgia no Brasil 2010-2025* - Acesso em 2018, disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Siderurgia_no_Brasil__9567.pdf/893da7ee-8608-4251-adc1-10c2bf95b009?version=1.5

CGEE, 2014 - *Centro de gestão e estudos estratégicos* - Acesso em 2018, disponível em: <http://docplayer.com.br/29111741-Levantamento-dos-niveis-de-producao-de-aco-e-ferro-gusa-cenario-em-2020.html>

CPFL, 2018 - Acesso em 2018, disponível em: <https://www.cpfl.com.br/Paginas/default.aspx>

DEPEC, 2017 - *Departamento de pesquisas e estudos econômicos* - Acesso em 2018, disponível em: https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_siderurgia.pdf

DIAS, C. A. C. M., 2011 - *Reciclagem de lama de alto-forno em cerâmica vermelha* - Acesso em 2018, disponível em: <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/tese-completa-corrigida.pdf>

DINIZ, E. J., 2014 - *Desenvolvimento de um sistema de transferência transcutânea de energia adequado*

DNPM, 2016 - *Departamento nacional de produção mineral* - Acesso em 2018, disponível em: Anuário Mineral Brasileiro : <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie->

estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro-2016-metalicos

ELETROBRÁS, 2006 - *Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações* - Eletrobras, Procel Educação - 3. ed. Itajubá: 596 p.

ELEKTRO, s.d. - *Eletricidade e Serviços S.A.* - Acesso em 2018, disponível em: Manuais Elektro de Eficiência Energética

EPE, 2009 - *Empresa de Pesquisa Energética - Nota Técnica DEA 02/09* - Acesso em 2018, disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/20090430_2\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/20090430_2[1].pdf)

EPE, 2017 - *Empresa de Pesquisa Energética - NOTA TÉCNICA DEA 001/17*. Acesso em 2018, disponível em: [http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF\[1\].pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF[1].pdf)

FERNANDES, M. V., 2007 - *Efeito do tipo de carvão injetado nas ventaneiras do alto-forno no consumo de combustíveis (Fuel-Rate)*

FG, 2018 - *Ferramentas Gerais LTDA - Catálogo de lâmpadas* – Acesso em 2018, disponível em: <http://www.fg.com.br/lampada-vapor-sodio-son-t-400w-48000lm-e40-osram/p?idsku=5322014>

FUKUOKA, R., 2016 - *Gestão de energia com Variadores de frequência (VFDs)*. - Acesso em 2018, disponível em: MITISIDI PROJETOS: <http://mitsidi.com/gestao-de-energia-vfds/?lang=pt-br>

GE COMPANY, 2018 - *Melhore a eficiência da sua planta através de uma medição precisa e confiável do Flare com um contrato de serviços integral BHGE* - Acesso em 2018, disponível em: https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/flare_flow_meters_improve_efficiency_portuguese_a4.pdf

GERDAU, s.d. - *Tratamento térmico* - Acesso em 2018, disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf

GONÇALVES, E. S. S., 2011 - *Modelo de simulação em tempo real de um forno de reaquecimento de tarugos para laminação*, UFMG 2011 - Acesso em 2018, disponível em: http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-95QHWCW/engmec_nica_eduardos_rgiosilvagon_alves_disserta_o.pdf?sequence=1

GORNI, A. A., 1996 - *Inovações tecnológicas na laminação de chapas grossas: equipamentos*

GORNI, A. A., 2008 - *Aproveitamento de sucata de pneus e resinas plásticas* - PlastShow 2008 Feira e Congresso. São Paulo

GORNI A. A., PFEILSTICKER, G. K., SILVA, L. R. FREIRE JR, P., 2013 - *Balanco térmico de fornos para recozimento em caixa de bobinas laminadas a frio 1.* - Acesso em 2018, disponível em: http://www.gorni.eng.br/Gorni_CongABM_2003.pdf

HTL, s.d. – *Tabela de equivalência entre lâmpadas LED e lâmpadas convencionais* – Acesso em 2017, disponível em: <http://www.htlbrasil.com/Arquitetura/PDF/tabela-de-equivalencia-de-iluminacao-e-economia-de-energia-eletrica.pdf>

IABr, 2015 - *Instituto Aço Brasil* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>

IABr, 2016 - *Instituto Aço Brasil* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>

IABr, 2017 - *Instituto Aço Brasil* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>

IABr, 2018 - *Instituto Aço Brasil* - Estudo EPE - Informações indústria do aço de 16/03/18

INGETEA, 2018 - *Sistemas elétricos e de automação para laminadores* - Acesso em 2018, disponível em: https://www.ingeteam.com.br/pt-br/industria/siderurgia/p16_29_124_0/sistemas-eletricos-e-de-automacao-para-laminadores.aspx

ISO 50001 IET - *Impact Estimator Tool* - (IET 50001 V1.1.5) - Berkeley Lab

SAIZ, J., 2012 - *Ingeniería Siderúrgica - Proceso de sinterización, 2015* - Acesso em 2018, disponível em: <http://studylib.es/doc/6408977/proceso-de-sinterizaci%C3%B3n>

JASE W., 2018 - *Planta de Turbina de Recuperação de Topo (TRT)* - Acesso em 2018, disponível em: https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies-p/pdf/iron_steel/S-08.pdf

JCOAL, 2018 - *Coke Dry Quenching Technology* - Acesso em 2018, disponível em: Japan Coal Energy Center: http://www.jcoal.or.jp/eng/cctinjapan/2_3A5.pdf

JESUS, H. S., 2016 - *Avaliação e comparação umidade de coque alto-forno* - In: 46º Seminário de Redução/ 17º Minério de Ferro/ 4º Aglomeração, Rio de Janeiro, 2016

JUNIOR, A. D. S., 2011 - *Possibilidades e impactos da ampliação da siderurgia a carvão vegetal oriundo de florestas plantadas no Brasil* - UFRJ, COPPE

JUNIOR, F. G. T., MELO, W. A., s.d. - *Balanco de massa e energia em um conversor LD* - Acesso em 2018, disponível em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgxGoAJ/balanco-massa-balanco-termico>

JUNQUEIRA, Y. S., HENRIQUE, N. I., COELO, R. J., ANDRADE, L. A., e outros, 2016 - *PID Combustão - Um melhor controle para a queima dos gases em coqueria Heat Recovery*

- JRC, 2012 - *Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO2 Emissions in the EU Iron & Steel Industry* - JRC Scientific and Policy Reports - N. Pardo, J.A. Moya, K. Vatopoulos
- KB ELIPSE, 2018 - *Automação do processo de sinterização* - Acesso em 2018, disponível em: http://kb.elipse.com.br/en-us/questions/4679/___print
- KROBATH, M., 2008 - *Optimierung von metallurgischen Prozessen mit Hilfe von Simulationen. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* (153), 162-168
- KUBERCZYK, R., BERNER, HJ. & BARGENDE M., 2009 - *Differences in Efficiency between SI Engine and Diesel Engine, MTZ Worldw* (2009) 70: 60. doi:10.1007/ BF03227927 Naciones Unidas (1987), "Nuestro futuro común" o "Informe Brundtland", New York
- LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. A., 2010 - *Tratamento de Minérios* – 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT
- MACHADO, M. L., 2003 - *Siderurgia para não siderurgistas* - Vitória
- MACHADO, M. L. P., 2006 - *Apostila de SIDERURGIA da matéria-prima ao aço laminado* - CEFETES – Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo (janeiro 2006)
- MARANHÃO, E. A., 2017 - *Noções básicas sobre refino do aço em forno panela da aciaria* - Acesso em 2018, disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/noções-básicas-sobre-refino-do-aço-em-forno-panela-da-alves-maranhão>
- MMA, 2018 - Ministério do meio ambiente - *Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>
- MONTEIRO, M. A., 2004 – Em busca de energia barata e com escassa prudência ambiental: o caso do deslocamento de siderúrgicas para a Amazônia. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ABIENTE E SOCIEDADE, 2., 2004, Indaiatuba: ANNPAS, 2004, v. 1
- MORRIS, A., 2016 - *Melhorando a eficiência energética com queimadores recuperativos e regenerativos* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.aquecimentoindustrial.com.br/noticias/2709-2/>
- MOURÃO, J. M., 2017 - *Aspectos conceituais relativos à pelletização de minérios de ferro* - Vitória - ES: conceitual consultoria minero-siderúrgica
- MOURÃO, M. B., 2013 - *Fundamentos da siderurgica* - Curso abm \u2013 EAD
- OLIVEIRA, R. S., 2009 - *Análise da fabricação de fio retangular de cobre eletrolítico, com seção de 3,5 x 8,8 mm a partir de vergalhão cilíndrico de diâmetro 8 mm* - Belo Horizonte
- NEVES, A. S., DANIEL, B. T., & SILVA, R. N., s.d. - *Avaliação da altura do leito de sinterização em um reator vertical de leito fixo para a produção de sínter* - Megatendências: Desafios e oportunidades para o futuro da Química

PAUL WURTH, 2018 - *Sistemas de automação e supervisão de fornos* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.paulwurth.com/pt/NOSSAS-ATIVIDADES/Fabrica%C3%A7%C3%A3o-de-ferro/Sistemas-de-Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Supervis%C3%A3o-de-Fornos>

PAVANATI, H. C., s.d. - *Beneficiamento do Aço* - Acesso em 2018, disponível em: <http://livrozilla.com/doc/93679/beneficiamento-do-a%C3%A7o>

PECTRU, s.d. - *Tratamento Térmico dos aços : Recozimento, Normalização, Têmpera e Revenido* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/tratamento.pdf>

PEREIRA, R. R., 2009 - *Ajuste da composição química do aço CA-50* - Acesso em 2018, disponível em: UEZO: <http://www.uezo.rj.gov.br/tccs/capi/RaulPereira.pdf>

PRAES, G. E., FONSECA, M. C., e outros, 2015 - *Utilização de biomassa para aumento da temperatura de secagem de pelotas de minério de ferro nos fornos de grelha móvel da Samarco Mineração S.A. ** - 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week, realizada em 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

REIS, K. C., 2017 - *Aplicação da ferramenta masp para redução do consumo de areia ebt no forno elétrico a arco de uma siderúrgica* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.ufjf.br/engenhariadeproducao/files/2016/12/KLISSIAN-CHINAIDER-DOS-REIS-VERS%C3%83O-FINAL.pdf>

RIZZO, E. M., 2006 - *Introdução aos processos de refino secundário dos aços* (1 ed.). ABM

RODRIGUES, P. E., LOBÃO, D., PONTES, J. R., CARDOSO, P. A., 2003 - *Aproveitamento de características físicas dos gases de alto forno para geração de energia elétrica em uma siderúrgica: O caso da Companhia Siderúrgica de Tubarão*

ROSSI, D., 2014 - *Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco* - Acesso em 2018, disponível em: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. <http://hdl.handle.net/10183/114957>

RUBIM, C., 2013 - *Compressores e sopradores aplicados em tratamento de água, efluentes e saneamento* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=15618&link=noticias>

SARTORI, S. C., SARTORI, J. C., s.d. - *Análise dos riscos e medidas de segurança em fornos de atmosfera controlada para tratamento térmicos e termoquímicos*. Acesso em 2018, disponível em: <http://www.itarai.com.br/files/G.pdf>

SCHEID, A., s.d. - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná - Acesso em 2018, disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM049/Aula%201.pdf>

SENAI, 2000 - Apostila, Módulos especiais - mecânica - SENAI, SP - Acesso em 2018, disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/20054098/apostila---sistemas-de-cristalizacao---senai>

SICETEL, 2016 - *Sindicato nacional da indústria de trefilação e laminação de metais ferrosos* - Acesso em 2018, disponível em: <http://sicetel.org.br/antigo/sicetel2014/wp-content/uploads/2015/13/anuario-sicetel-2016.pdf>

SILVA, D. A., 2013 - *Curso de Especialização em Tratamento de Minérios*, UFG - Campus Catalão, Engenharia de Minas - Acesso em 2018, disponível em: https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/aglomeracao_3.pdf

SILVA, D. G., VASCONCELOS, W. L., 2017 - *Isolante térmico fibroso: motivos de sua utilização como revestimentos de trabalho em equipamentos industriais que operam em altas temperaturas* - Acesso em 2018, disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132017000300281&lng=pt&tlng=pt

SILVA, H. P., 2016 - *Efeito da adição de pó de balão na combustibilidade do carvão* - Acesso em 2018, disponível em: Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Ciências – Física de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto: http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/8472/1/DISSERTACAO_EfeitoAdi%C3%A7%C3%A3oP%C3%B3.pdf

SILVA, J. N., 2011 - *Siderurgia*. (I. :. UFSM, Ed.) - Acesso em 2018, disponível em: http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/siderurgia.pdf

SILVA, L., 2017 - *Uso de água de chuva para repor perdas por evaporação em processos de laminação a quente de aço* - UFMG - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUBD-ALTFGM>

SINDIFER, 2016 - *Sindicato da indústria do ferro no Estado de Minas Gerais* - Acesso em 2018, disponível em: http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario_2016.pdf

SINOBRAS, s.d. - *Siderúrgica Norte Brasil S.A.* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.sinobras.com.br/>

SOARES, L. N., 2011 - *A exergia e a sustentabilidade aplicadas a uma usina siderúrgica integrada a carvão vegetal* - UFMG, 2011 - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8NWHFB>

SOUZA, E. R., 2015 - *Uso intensivo de sucata triturada no forno elétrico a arco* - 2015. 44 p. (Engenharia metalúrgica) – UFMG, Minas Gerais

STEAM, 2005 - *Steam: Its Generation and Use* - 41th Edition - New York: The Babcock & Wilcox Co., 2005

TAETS, L. A. R., 2014 - *Análise da participação do Gás Natural na matriz energética e a aplicação desse combustível no processo de Pelotização de Minério de Ferro* -

Universidade Federal de Itajubá - Acesso em 2018, disponível em:
<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/291>

UFSCAR, 2010 - Sistemas de cogeração - Thiago Chiericato, Ribeirão Preto, 2010 - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.etanol.ufscar.br/trabalhos-mta/sertaozinho-i-c/trabalhos/monografia-thiago-chiericato.pdf>

UFPR, s.d. - *Produto do Laminador de Tiras à Frio* - Acesso em 2018, disponível em:
http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM048/LTF_Full%20Hard.pdf

VALE, 2018 - *Mineradora VALE* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.vale.com>

VALE, 2014 - *Fluxo do processo de pelotização* - Acesso em 2018, disponível em:
<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/entenda-funciona-processo-pelotizacao-usinas.aspx>

VALER, EDUCAÇÃO VALE, s.d. - *Curso de Mineração - Básico: Módulo IV: Pelotização e Uso de Minério de Ferro na Siderurgia* - Acesso em 2018, disponível em:
http://pua.projetosvale.com.br/assets/documentos/mineiracao/apo_CBM_modulo_4.pdf

VIANA, F. L., 2017 - *Caderno Setorial ETENE*. Banco do Nordeste

VIEIRA, D. D. C., OLIVEIRA, T. L., 2016 – Abm week - *Cálculo da eficiência térmica do glendon* - Acesso em 2018, disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/calculo-da-eficiencia-termica-do-glendon>

VIEIRA, D. H., 2012 - *Avaliação de parâmetros operacionais que influenciam a taxa de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos a carvão vegetal*. Belo Horizonte

VIEIRA, D., ALMEIDA, R. A., BIELEFELDT, W. V., VILELA, A. C., 2015 - *Avaliação da escória para reduzir o consumo de energia e a instabilidade elétrica do FEA* - Proceedings of the Steelmaking, Casting and Non-Ferrous Metallurgy Seminar, 46, págs. 504-513. Rio de Janeiro

WEG, 2018 - *Calculadora de preços de motores* – Acesso em 2018, disponível em:
<https://www.weg.net/see+/pages/regua.jsp>

WOOD, R., 2018 - *Mistura de carvões para o coque metalúrgico* - BNDES

WORRELL, E., 2008 - *Energy efficiency improvement opportunities for the cement industry* - Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory - *Energy Analysis Department, California*

WORRELL, E., 2010 - *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry* - Acesso em 2018, disponível em: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers:
https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Iron_Steel_Guide.pdf

WORLD STEEL ASSOCIATION, 2017 – *WORLDSTEEL* - Acesso em 2018, disponível em: Global Steel Industry: outlook, challenges:
https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:d9e6a3dfff19-47ff-9e8ff8c136429fc4/International+Steel+Industry+and+Sector+Relations+Conference+Istanbul_170420.Pdf

YAMAGUCHI, K.; UENO, H.; TAMURA, K., 1992 – *Maximum injection rate of pulverized coal into blast furnace through tuyeres with consideration of unburnt char* – ISI International, v. 32, n. 6, p. 716-724

ANEXOS

- a. Estrutura do questionário utilizado na pesquisa
- b. Relação de questionários respondidos
- c. Detalhamento da seleção de amostras