

ESTUDO SOBRE O USO DE UM MOTOR STIRLING COMO SISTEMA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO O RESÍDUO TÉRMICO DA ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA*

*Eduardo Hollanders de Moura¹
Paulo Santos Assis²
Carlo Tripoli³*

Resumo

Este artigo mostra como a utilização de um motor Stirling pode tornar o processo siderúrgico mais sustentável e rentável ao gerar energia elétrica com o resíduo térmico da escória de aciaria elétrica. Foi utilizado um modelo teórico para o desenvolvimento do motor, com considerações para aproximar o resultado da realidade. Pelos resultados obtidos, pode ser observado uma economia de quase 8 milhões de reais por ano na siderurgia nacional.

Palavras-chave: Motor Stirling; Cogeração de Energia; Resíduo Térmico; Escória.

STUDY ABOUT THE USE OF A STIRLING ENGINE AS AN ENERGY COGENERATION SYSTEM USING THE THERMAL WASTE OF THE ELECTRIC STEELMAKING SLAG

Abstract

This paper shows how the use of a Stirling engine can make the steelmaking process more sustainable and profitable by generating electrical energy with the thermal waste of the electric steelmaking slag. A theoretical model was used to develop the engine, with considerations to approximate the result of reality. The results obtained shows that 8 million reais can be saved per year in the national steel industry.

Keywords: Stirling Engine; Energy Cogeneration; Thermal Waste; Slag.

¹ *Engenheiro Metalurgista, bacharel, bolsista, REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista, Phd, professor titular, DEMET, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico, bacharel, Ingegneria industriale, Università degli Studi di Palermo, Palermo, Sicília, Itália.*

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o uso sustentável do nosso planeta é cada vez mais impactante na nossa sociedade. Por isso, desenvolver o nosso setor industrial para otimizar a utilização de recursos é extremamente importante para o futuro do nosso planeta e traz benefícios diretos para a indústria, como economia no processo e maior lucratividade. Para atingir esse objetivo, uma excelente alternativa é o uso de cogeração de energia, que recupera os resíduos térmicos gerados e proporciona um novo destino, seja ele a reutilização no processo ou o retorno a rede [1].

Sabendo disso, é possível utilizar estratégias já existentes para construir uma matriz energética mais dependente da cogeração. Uma das possibilidades é usar o motor Stirling, que é capaz de transformar energia térmica em energia mecânica, por meio do aquecimento e expansão de um gás que realiza trabalho ao movimentar um pistão a partir da energia recebida por uma fonte de calor externa [2] como a escória de aciaria elétrica.

1.1 A Energia no Brasil e no Mundo.

Hoje, cerca de 82% da energia brasileira é produzida por fontes renováveis e 65% desses por hidrelétricas. Na Tabela 1, pode-se observar os dez maiores produtores de energia renovável e quais são as principais fontes utilizadas. Esses valores do Brasil geram muito contraste quando comparados com os valores médios de produção de energia no mundo, que tem apenas 13% da sua energia provinda de fontes renováveis [3].

No Brasil, a metalurgia consome cerca de 23% de toda a energia utilizada pelas indústrias e 7,5% de toda a energia nacional [4]. Isso mostra que qualquer tipo de reaproveitamento pode gerar um impacto significativo para as indústrias e mais ainda, para o país.

Tabela 1. Ranking dos países com maior produção de energia renovável (TWh)

Ranking do país		1 China	2 Estados Unidos	3 Brasil	4 Canadá	5 Rússia	6 Índia	7 Noruega	8 Alemanha	9 Japão	10 Venezuela
Hídrica	2010	713.8	260.2	399.3	347.8	164	113.3	115.6	20.22	81.39	76.01
	2011	690.6	319.4	424.1	371.9	164.2	129.4	119.6	17.1	82.36	82.83
	2012	856.4	276.2	411.2	376.2	161.6	114.5	140.4	21.2	76.9	80.9
Eólica	2010	44.6	94.7	2.2	9.6	0.004	19.9	0.9	37.8	4.0	-
	2011	73.2	120.2	3.0	19.7	0.0	26.0	1.3	46.5	4.3	-
	2012	-	141	-	23	-	-	2	46	5	-
Solar	2010	0.94	1.21	-	0.16	-	0.02	0.02	11.68	3.80	-
	2011	3.00	1.80	-	0.40	-	1.00	0.02	19.00	3.80	-
	2012	-	4.33	-	0.507	-	-	0.03	28.0	4.19	-
Biomassa	2010	11.41	68.94	31.5	8.710	2.77	2.06	0.45	39.87	23.45	-
	2011	34	70.8	32	6.4	2.8	4.0	0.48	43.6	23.15	-
	2012	43.56	71.41	34.0	6.38	2.8	4.13	0.48	44.25	23.15	-
Geotérmica	2010	0.16	15.22	-	-	0.51	-	-	0.03	2.63	-
	2011	0.16	15.3	-	-	0.51	-	-	0.02	2.65	-
	2012	0.16	15.56	-	-	0.51	-	-	0.02	2.92	-
Outras Fontes	2010	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-
	2011	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-
	2012	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-
Total	2010	770.9	440.2	432.9	366.3	167.3	135.3	116.9	109.6	115.2	76.0
	2011	801.0	527.5	459.1	398.4	167.5	160.4	121.4	126.2	33.9	82.8
	2012	900.1	508.4	445.2	406.2	164.9	118.6	142.6	139.5	112.0	80.9

1.2 Os Motores Stirling

Os motores Stirling são divididos em três categorias principais, alfa, beta e gama [6].

No motor Stirling tipo alfa, existem dois pistões de trabalho, em cilindros separados. Os cilindros podem ser posicionados em paralelo ou perpendiculares entre si. No modelo alfa tradicional, os pistões são conectados a um virabrequim utilizando bielas. Uma das desvantagens desse modelo ter bielas é a perda de energia devido a fricção consideravelmente alta, que gera necessidade do uso de lubrificante e este acaba criando uma camada sobre a superfície de transferência de calor, prejudicando o desempenho.

No motor tipo beta, o pistão e o deslocador ocupam o mesmo cilindro, sendo o deslocador um tipo especial de pistão que desloca o gás de trabalho entre o espaço quente e o espaço frio. O arranjo mecânico desse tipo de motor é mais complexo devido ao movimento do deslocador ser controlado por uma haste que atravessa um furo no centro do pistão. Entretanto, o motor tipo beta tem diversos arranjos internos, como o arranjo rômboico, que não cria uma força de impulso entre o pistão e a superfície do cilindro. Graças a essa movimentação sem fricção, a necessidade de lubrificação é praticamente não existente [7].

No motor tipo gama, são usados um pistão e um deslocador em cilindros separados.

No modelo convencional, o movimento entre esse pistão e o deslocador é feito por uma biela. Os cilindros podem ser posicionados em paralelo ou perpendiculares um ao outro.

O ciclo ideal de um motor Stirling consiste em dois espaços interconectados pelo regenerador. O fluido de trabalho é um gás ideal (com propriedades térmicas constantes e sem perdas de pressão) e que sempre estará na zona quente ou na zona fria, ou seja, sem volume morto. Como mostra a Figura 1, um pistão frio no ponto mínimo inferior (PMI) e um pistão quente no ponto mínimo superior (PMS). Todo o volume de trabalho está no cilindro frio e o pistão frio se move em direção ao PMS e comprime o gás. Calor é retirado do gás através das paredes do cilindro e a compressão continua a temperatura constante. Esse processo pode ser entendido pelo diagrama (p-v) e no diagrama de temperatura e entropia na Figura 2 [8].

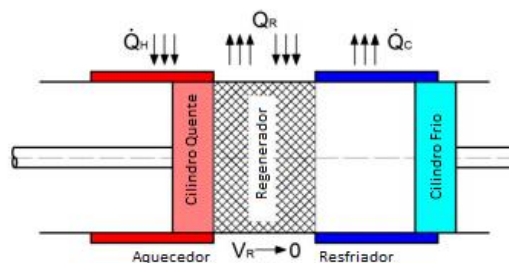


Figura 1. Diagrama esquemático de um motor Stirling ideal. Adaptada.

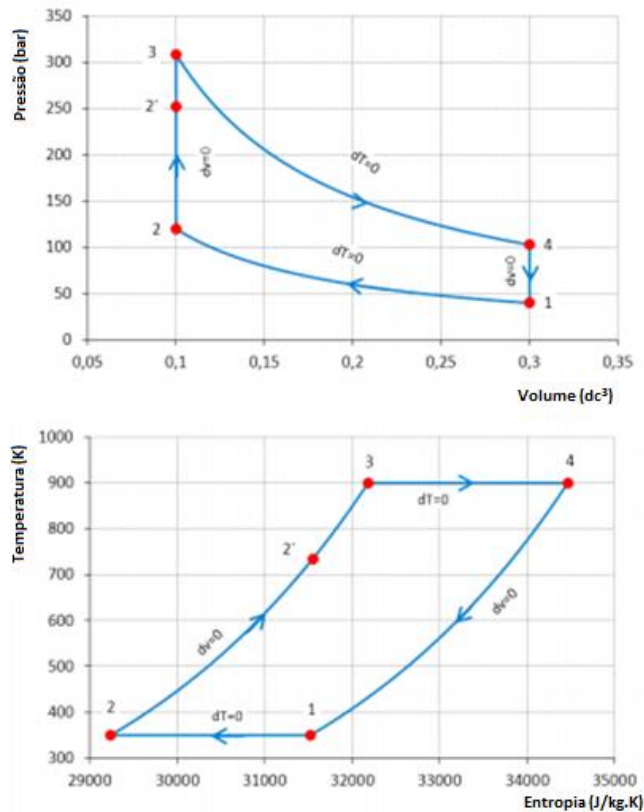


Figura 2. Diagramas de pressão – temperatura e volume – e entropia de um ciclo Stirling ideal.
Adaptada

Além disso, é importante mencionar que as perdas mecânicas chegam a 25% da potência e as perdas por condução em um terço desse valor [9]. Atualmente, a eficiência real dos motores Stirling chega em 15%.

1.3 A Energia na Siderurgia

O Brasil ocupa a 9ª posição no ranking mundial de produção de aço bruto, sendo responsável por 2,1% de toda a produção mundial [10].

E dois processos principais para o refino do aço, o conversor a oxigênio (LD) e o forno a arco elétrico. Sendo que os dois processos tem como objetivo retirar elementos prejudiciais para a qualidade do aço e tornar a composição do produto ideal. Nesse processo de refino da composição, o oxigênio funciona como agente oxidante e CaO como escorificante, ou seja, formador de escória, que incorpora todos esses elementos deletérios e os retira do banho metálico [11].

Após o vazamento a escória é vertida em um pátio de resfriamento onde fica exposta ao ar e, quando a temperatura se aproxima de 600°C, o resfriamento é acelerado por jatos de baixa vazão de água. Depois da solidificação completa ela é fragmentada e levada para processos posteriores. A partir disso, pode ser percebida a grande quantidade de energia cedida ao ambiente durante o processo quando um material a mais de 1600°C é resfriado ao ar e depois com água até alcançar a temperatura ambiente. Como pode ser visto na Figura 3, a escória leva meia hora para arrefecer até 400°C e 40 minutos para chegar em 300°C [12] e tem um calor específico de 0,18kcal/kg.°C [13].

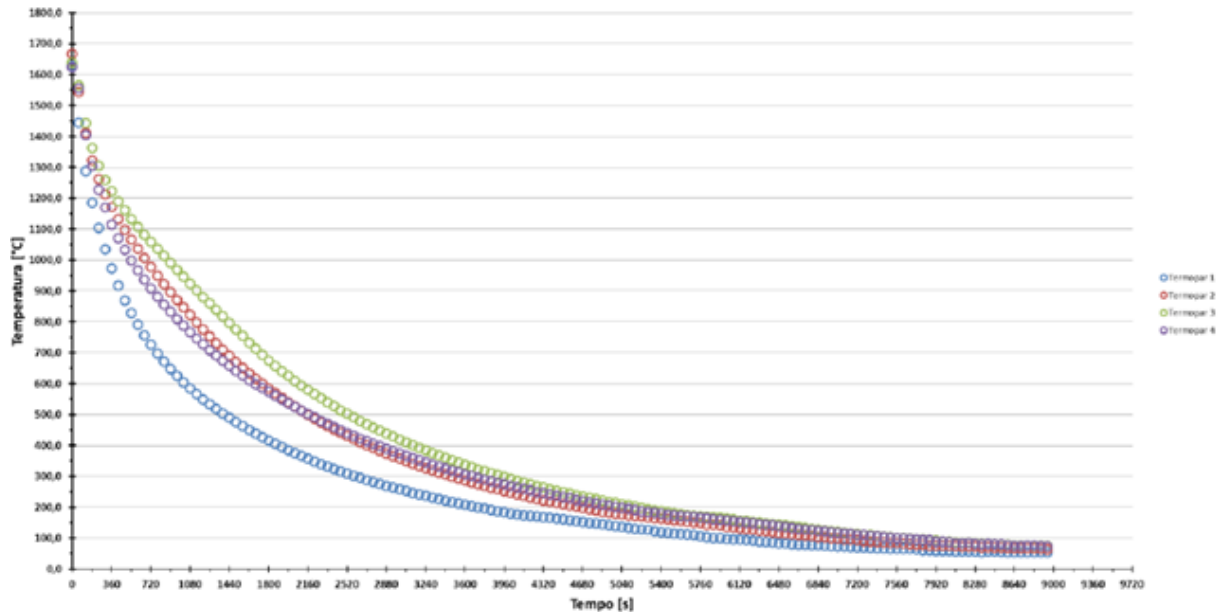


Figura 3. Resfriamento da escória ao longo do tempo

Para cada tonelada de aço produzido, são gerados entre 80kg e 150kg de escória [14]. No Brasil, em 2017, foram produzidas 34,4 milhões de toneladas de aço e 24% dessa produção é feita em EAF (forno de arco elétrico), o que resulta em 8,25 milhões de toneladas de aço e até 1,2 milhões de toneladas de escória [14].

Pela Equação 1, podemos estimar a quantidade de calor contida na escória e que pode ser reaproveitada nos processos siderúrgicos. Nela, Q é a quantidade de calor, m a massa da escória, c o calor específico da escória e ΔT é a variação de temperatura.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Essa equação não determina a quantidade de energia a ser reaproveitada pelo motor, mas a energia térmica intrínseca à escória. Sendo necessário utilizar o resultado dela, com o devido rendimento e perdas do motor para que um valor verdadeiro de reaproveitamento seja alcançado.

2 DESENVOLVIMENTO

Nesse estudo foi utilizado um motor Stirling, tipo beta, com mecanismo rômbo, proposto por Organ [9] e utilizando alguns valores operacionais para o Motor Stirling GPU-3. Um motor Stirling tipo beta e com mecanismo rômbo pode ser visto na Figura 4.

A coleta da energia térmica é feita aproximando a câmara de expansão do motor da escória durante o vazamento, essa aproximação é suficiente para aquecer o ar que está contido na câmara de expansão e, a partir do momento que é dada uma partida efetiva no motor, ele começará a movimentar-se, transformando a energia térmica absorvida em energia mecânica e posteriormente, com a utilização de correias ligando o mecanismo rômbo a um gerador, em energia elétrica.

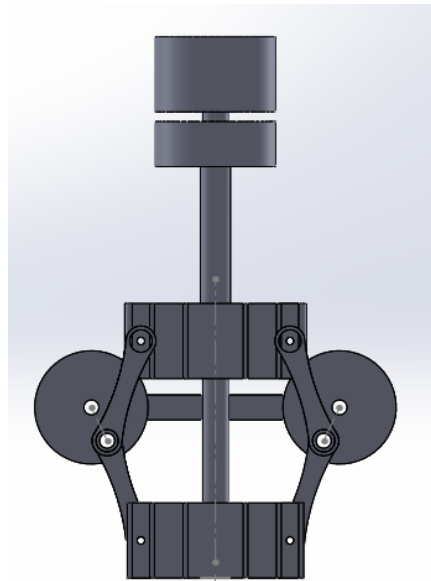


Figura 4. Motor Stirling com mecanismo rômico

Visto que a cabeça do motor pode alcançar temperaturas elevadas, maiores que 1000°C, durante o início da operação, é importante ressaltar a preocupação com o material em que ele será confeccionado.

A temperatura média encontrada para a escória durante os primeiros 40 minutos de resfriamento é de 1021K, mantendo uma proporção entre T_q (temperatura de fonte quente) e T_f (temperatura de fonte fria) de 3.3 para um uso ótimo do motor, T_f deve ser igual a 310K.

O primeiro parâmetro no desenvolvimento do motor é o Número de Beale (N_b), que como proposto na literatura tem um valor ideal de 0,15 e é determinado pela Equação 2.

$$N_b = \frac{P}{P_{ref} \cdot V_d \cdot \omega / 60} \quad (2)$$

Em que P é a potência do motor, P_{ref} é a pressão de referência [Pa], V_d é o volume deslocado [cm^3] e ω é a velocidade do motor em rotações por minuto (rpm).

O motor proposto nesse estudo tem potência de 1400W, velocidade de 1500rpm, a pressão de referência é $15 \cdot 10^5$ Pa e o volume deslocado é 250cc.

Nesse ponto, é importante ressaltar que pelas dimensões do motor é possível fazer a associação de vários deles, aumentando a energia coletada e conseqüentemente gerando mais energia elétrica.

A partir de agora, foi considerado que existe uma associação de motores suficiente para reaproveitar toda a energia térmica disponível na escória do nosso país.

Colocando a meta de eficiência térmica (η_{th}) do motor em 20% e assumindo que toda a troca de calor é feita através do regenerador, temos as Equações 3 e 4:

$$Q'xe = \frac{Nb}{2\pi \cdot \eta_{th}} \quad (3)$$

$$Q'xc = Q'xe(1 - \eta_{th}) \quad (4)$$

Nelas, Q'xe e Q'xc são as cargas térmicas médias dos regeneradores de expansão e compressão, respectivamente. Q'xe = 0,12 e Q'xc = 0,09.

Depois disso, foi calculado o valor do tamanho de referência, $L_{ref} = Vd^{1/3} = 63\text{mm}$.

Os valores operacionais adimensionais, como o parâmetro de velocidade (N_{MA}), o parâmetro Stirling (N_{SG}) e parâmetro de Reynolds (N_{RE}) foram obtidos utilizando as Figuras 5,6 e 7. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 2.

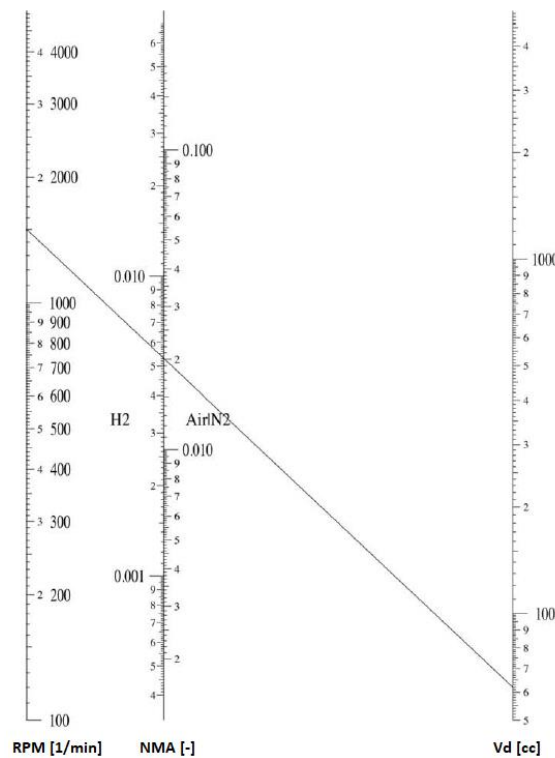


Figura 5. Obtenção de NMA utilizando os valores da velocidade e volume deslocado. Adaptada

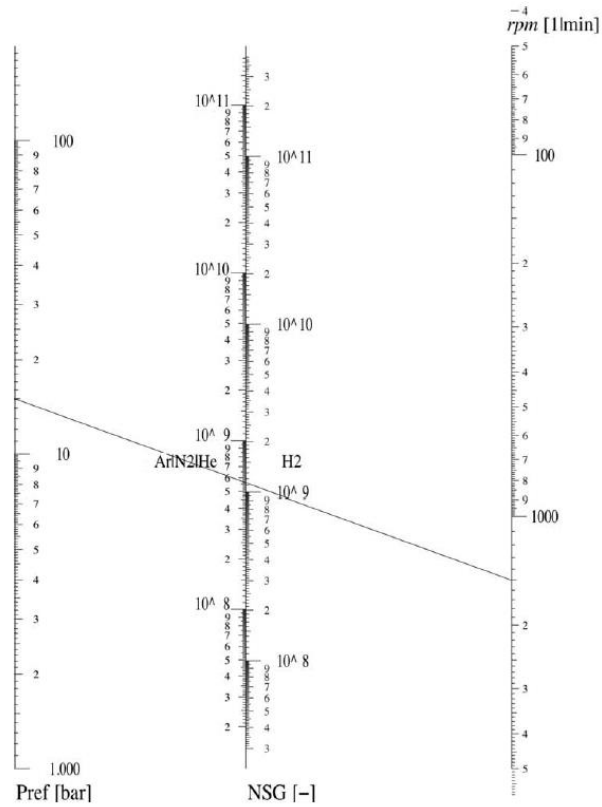


Figura 6. Obtenção de N_{SG} utilizando os valores da velocidade e volume deslocado. Adaptada.

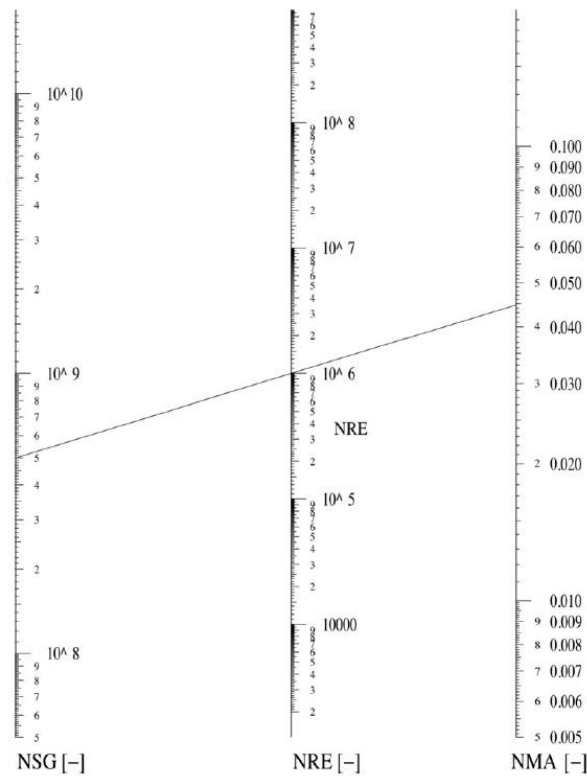


Figura 7. Obtenção de N_{RE} utilizando os valores de N_{SG} e N_{MA}

Tabela 2. Resultados obtidos para os valores operacionais adimensionais

N_{MA}	0,033
N_{SG}	$5,62 \cdot 10^8$
N_{RE}	$6,1 \cdot 10^5$

O comprimento da parte aquecida (L_x) foi determinado utilizando o valor comum do motor GPU-3 entre o tamanho de referência e o comprimento da parte aquecida. Então, $L_x/L_{ref} = 5$.

Utilizando esse mesmo valor de referência e multiplicando pelo valor de N_{MA} é possível encontrar o valor do Número de Unidades de Transferência (NTU) para o qual o trabalho perdido no regenerador é mínimo para os valores propostos de Q'_{xe} e L_x/L_{ref} . Para o regenerador da parte aquecida, o valor ideal de NTU é superior a 2.

Com o valor de NTU é possível obter a razão ótima entre comprimento e diâmetro (L_x/d_x) para a menor perda de calor. Essa razão é obtida usando a figura 8.

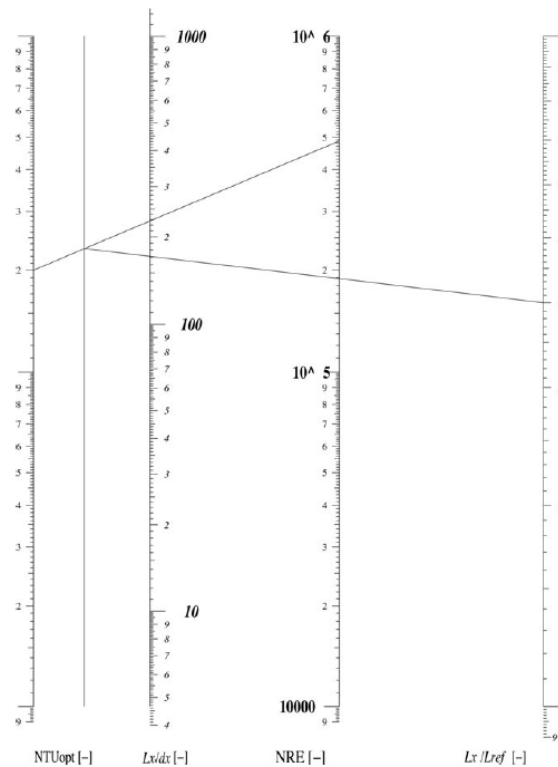


Figura 8. Obtenção da relação L_x/d_x utilizando os valores de NTU, N_{RE} e L_x/L_{ref} . Adaptada.

O procedimento para o design no regenerador de compressão segue os mesmos anexos. O valor utilizado na razão entre o comprimento da parte fria (L_{xc}) e L_{ref} foi 2,5. Os resultados obtidos para os comprimentos e diâmetros do motor podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Comprimentos e diâmetros do motor

Parte Quente		Parte Fria	
L_{xe} (mm)	315	L_{xc} (mm)	126

Dxe (mm)	2,38	Dxc (mm)	0,09
----------	------	----------	------

Quando colocamos as devidas perdas internas do motor, cerca de 25%, e perdas térmicas durante condução, convecção e radiação (cerca de 8,5%) a eficiência do motor cai para 13,3% e temos um valor bem próximo a realidade dos motores Stirling atuais.

Finalmente, utilizando a Equação 1, sabemos que a energia contida na escória do momento que é vazada até alcançar 600°C é de aproximadamente 180.000 kcal/ton ou 753,12 MJ/ton. Agora, multiplicando esse valor pela produção nacional de escória de aciaria elétrica por ano, temos $9,03 \times 10^5$ GJ de energia.

Como a eficiência do motor é de 13,3%, ele pode reaproveitar 100MJ de energia por tonelada e até $1,2 \times 10^5$ GJ da energia de toda a escória produzida, sendo capaz de gerar 33.415 MWh. A partir dessa energia gerada e do PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) médio entre julho de 2018 e julho 2019, que fornece o preço de R\$231,52 por MWh, é possível transformar esse reaproveitamento de energia em quase 8 milhões de reais por ano.

Aplicando esses resultados em uma indústria imaginária, com produção de 100.000 toneladas/ano temos os resultados na Tabela 4.

Tabela 4. Produção e economia de uma indústria imaginária

Aço (ton)	100.000
Escória (kg)	15000
Q (kcal)	255320,1
E (MWh)	0,29
Economia (R\$/ano)	602.300,67

É importante ressaltar que essa economia parte de recursos que atualmente são negligenciados e que possuem uma grande capacidade de cogeração e de economia para as indústrias.

3 CONCLUSÃO

Diante do atual panorama energético do Brasil, o grande consumo de energia das indústrias e da necessidade de cada vez mais buscarmos melhorias que tragam economia nos processos, é fundamental aumentar a eficiência energética das nossas siderúrgicas. A cogeração de energia feita nesse estudo é suficiente para uma economia de quase 80 milhões de reais em dez anos na siderurgia nacional e origina-se da escória, que normalmente não passa por nenhum processo de cogeração.

Na siderúrgica utilizada como exemplo, a economia proposta nesse artigo é uma novidade, com potencial de arrecadação acima de R\$6.000.000,00 em dez anos.

Além disso, com mais pesquisas é possível aumentar o rendimento do motor Stirling através de novos designs e adaptar o processo de vazamento da escória para

diminuir as perdas térmicas e melhorar a entrada de calor. Essa segunda alternativa também trará grandes melhorias no rendimento.

Estudos posteriores podem propor uma utilização deste mesmo motor para o reaproveitamento de energia de outros processos, como o vazamento do gusa e aumentar ainda mais o valor obtido pela cogeração de energia dentro dos processos siderúrgicos.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pelo incentivo a pesquisa, que me permite continuar os estudos, pesquisas e tentar criar novas formas de ajudar o nosso país.

REFERÊNCIAS

- 1 Ochoa AAV, Dutra JCC, Henríquez JRG, Rohatgi J. Energetic and exergetic study of a 10RT absorption chiller integrated into a microgeneration system. *Energy Conversion and Management*. 2014; 88, 545–553.
- 2 Sulzbach J. Projeto e fabricação de um motor Stirling modelo didático. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi. 2010.
- 3 Brasil. Indicadores de Energia no Mundo. Ministério de Minas e Energia. 2017; (42).
- 4 Brasil. Anuário estatístico de energia elétrica. Ministério de Minas e Energia 2018.
- 5 Estados Unidos. Renewable energy consumption and electricity preliminary statistics, Energy information administration. US, 2014.
- 6 Altin M, Okur M, Ipci D, Halis S, Karabulut H. Thermodynamic and dynamic analysis of an alpha type Stirling engine with Scotch Yoke mechanism. *Energy Conversion and Management*. 2018;148, 855-865.
- 7 Cheng CH, Yu Y. Combining dynamic and thermodynamic models for dynamic simulation of a beta-type Stirling engine with rhombic-drive mechanism. *Renewable Energy*. 2012;37(1):161-173
- 8 Červenka L. Idealization of The Real Stirling cycle. *Journal of Middle European Construction and Design of Cars*. 2017;(14): 19-27.
- 9 Organ A. J; *Stirling Cycle Engines: Inner Works and Design*. 1ª Edição. New Jersey: Wiley. 2014
- 10 Anuário Estatístico: Setor Metalúrgico/ Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. 1995 – Brasília: SGM, 2018.
- 11 Machado AT, Gomes AO, Cardoso RJC, Cruz EB. O uso de escórias de aciaria como agregado na construção civil. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, 2002.
- 12 Ferraro BB. Neiva AC. Silva ALN. Estudo das Propriedades Termofísicas de Escória Metalúrgica e de Escórias Sintéticas de CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2014.
- 13 Incropera FP, Bergman TL, Dewitt DP. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- 14 Organização Aço Brasil, Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>. Acesso em 21/03/2019 às 14:34.
- 15 Vilela AC F. Sustentabilidade do Setor Siderúrgico. São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/Workshop%20Agregado%209h.pps>
- 16 Cheng C, Yu Y. Numerical model for predicting thermodynamic cycle and thermal efficiency of a beta-type Stirling engine with rhombic-drive mechanism. *Renewable Energy*. 2010; 35, 2590–2601.