

ANÁLISE DAS PERDAS DE EFICIÊNCIA GLOBAL EM SISTEMAS DE COGERAÇÃO UTILIZANDO INDICADOR OEE

Analysis of global efficiency losses in cogenerative systems using oee indicator

Natan Felipe Silva¹, Emerson Paulino dos Reis¹, Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta¹, Neylor Makalister Ribeiro Vieira¹

¹Centro Universitário de Formiga-UNIFOR-MG. Formiga, Minas Gerais, Brasil.

Resumo

Introdução: A crescente demanda energética das últimas décadas contribuiu para a procura de fontes renováveis de energia e para utilização mais racional dos recursos energéticos disponíveis. Nesse sentido, a cogeração de energia destaca-se no contexto econômico, ambiental e energético pois possibilita o reaproveitamento energético no sistema produtivo. **Objetivo:** O presente estudo visa avaliar a eficiência de um sistema de cogeração que utiliza para geração de energia elétrica o GAF (Gás de alto forno), subproduto do processo de produção de ferro gusa. **Metodologia:** Para medir a eficiência do sistema, foi utilizado o indicador OEE (Overall Equipment Effectiveness) da filosofia TPM (Manutenção produtiva total) que possibilita verificar as perdas de eficiência. **Resultados:** A unidade cogeradora atingiu o índice de 50% de OEE, com uma produção média mensal de 779.170 KWh de energia elétrica. **Conclusão:** Observou-se no estudo que o indicador OEE apresentou resultados satisfatórios no monitoramento do sistema de cogeração, pois além de medir o desempenho do sistema, apresentou visão global do processo.

Palavras chaves: Cogeração; OEE - Overall Equipment Effectiveness; TPM.

Autor correspondente:

Natan Felipe Silva

Endereço: Rua Manaus, 860 -Lagoa da Prata -MG

E-mail: natanfelipesilva19@gmail.com

Recebido em: 16/05/18

Revisado em: 04/06/18

Aceito em: 18/10/18

Publicado em: 14/12/2018

Abstract

Introduction: The increasing energy demand of the last decades has contributed to the demand for renewable energy sources and for a more rational use of the energetic resources available. In this sense, energy cogeneration stands out in the economic context, environmental and energy context because it makes possible the reutilization of energy in the productive system. **Objective:** The present study aims to evaluate the efficiency of a cogeneration system that uses for electric power generation the GAF (Blast Furnace Gas), a byproduct of the pig iron production process. **Methodology:** In order to measure the efficiency of the system, the indicator OEE (Overall Equipment Effectiveness) was used from the philosophy TPM (Total Productive Maintenance) which makes it possible to verify the efficiency losses. **Result:** The cogeneration unit reached the 50% OEE index, with an average monthly production of 779,170 KWh of electricity. **Conclusion:** It was observed in the study that the OEE indicator presented satisfactory results in the monitoring of the cogeneration system, because in addition to measuring the performance of the system, presented an overview of the process.

Keywords: Cogeneration, OEE - Overall Equipment Effectiveness, TPM

Introdução

No Brasil, os altos custos da energia elétrica têm levado as indústrias a buscarem alternativas que reduzam a dependência de compra desse insumo. Segundo a Federação de Indústrias do Rio de Janeiro-FIRJAN¹, dentre um grupo de 27 países, o Brasil ocupa a posição de 1º lugar como custo de energia com a tarifa mais cara. Ainda segundo a FIRJAN¹, o custo de energia elétrica no Brasil é 109% maior do que a média dos países selecionados na pesquisa. Assim, para que as indústrias se mantenham competitivas no mercado, é necessário buscar energias alternativas e com custo mais acessível como energia gerada no processo de cogeração através do gás natural ou oriundo de processos industriais.

A cogeração de energia é o processo que combina a produção simultânea de diferentes fontes de energias, como a energia térmica e elétrica². Na siderurgia, a cogeração é amplamente aplicada devido ao aproveitamento dos subprodutos gerados no processo de redução de minério, destacando-se do ponto de vista energético, o GAF (gás do alto forno). O GAF é gerado no processo de redução de minério de ferro na transformação em ferro gusa e pode ser reaproveitado em sistema de cogeração, porém para que um sistema funcione com eficiência, este deve ser monitorado e controlado por indicadores de desempenho³.

Para medir o desempenho existem vários indicadores. Entre tantos, destaca-se o indicador OEE (overall equipment effectiveness), por medir o desempenho de forma tridimensional, pois considera o tempo útil que a máquina dispõe para produzir, a eficiência da produção (capacidade de produzir na capacidade nominal) e a qualidade do produto⁴.

O indicador OEE tem destacando-se na manufatura, mas também tem sido aplicado em sistemas de cogeração apresentando resultados satisfatórios, o que justifica sua aplicação no presente trabalho^{5,6,7,8}.

Com objetivo de colaborar com o aprofundamento científico acerca dos sistemas de cogeração e de demonstrar os benefícios do reaproveitamento energético por meio do GAF, o objetivo deste trabalho é: avaliar a eficiência global de uma unidade cogeneradora de energia, que utiliza como subproduto o GAF, para geração de energia por meio do indicador OEE (overall equipment effectiveness). Os objetivos específicos são i) aplicar o indicador OEE em uma unidade cogeneradora; ii) levantar as principais perdas de eficiência do sistema; iii) demonstrar que indicador OEE pode ser utilizado em unidades de cogeração siderúrgicas.

GAF - Gás de Alto Forno

O GAF é um subproduto gerado no processo de redução de minério de ferro quando transformado em gusa no alto forno que pode ser usado na substituição de fontes energéticas para geração de energia como o gás natural⁹. Sua composição pode variar de acordo com o processo de beneficiamento de ferro gusa e o GAF possui um alto valor energético¹⁰. A TAB. 1 demonstra a composição média do GAF¹¹.

Tabela 1: Composição do GAF(% Vol)

Gás	Composição no GAF(%)
Monóxido de Carbono (CO)	25 a 30
Dióxido de Carbono (CO ₂)	12 a 25
Hidrogênio (H ₂)	3 a 6
Metano (CH ₄)	1 a 2
Nitrogênio (N ₂)	45 a 50

A composição do GAF também pode variar de acordo com o tipo de gusa produzido, uma vez que há três tipos de gusa produzidos em um alto-forno de carvão vegetal: Aciaria, Cinzento e Nodular⁹. Este estudo analisará somente o gusa para Aciaria. O processo de redução do ferro gusa acontece de modo

que o oxigênio do ar pré-aquecido é injetado na parte inferior do alto forno. O carvão vegetal ao ser queimado mistura-se ao minério de ferro gerando gases, entre eles o GAF¹². A FIG. 1 mostra o processo de fabricação do ferro gusa¹³.

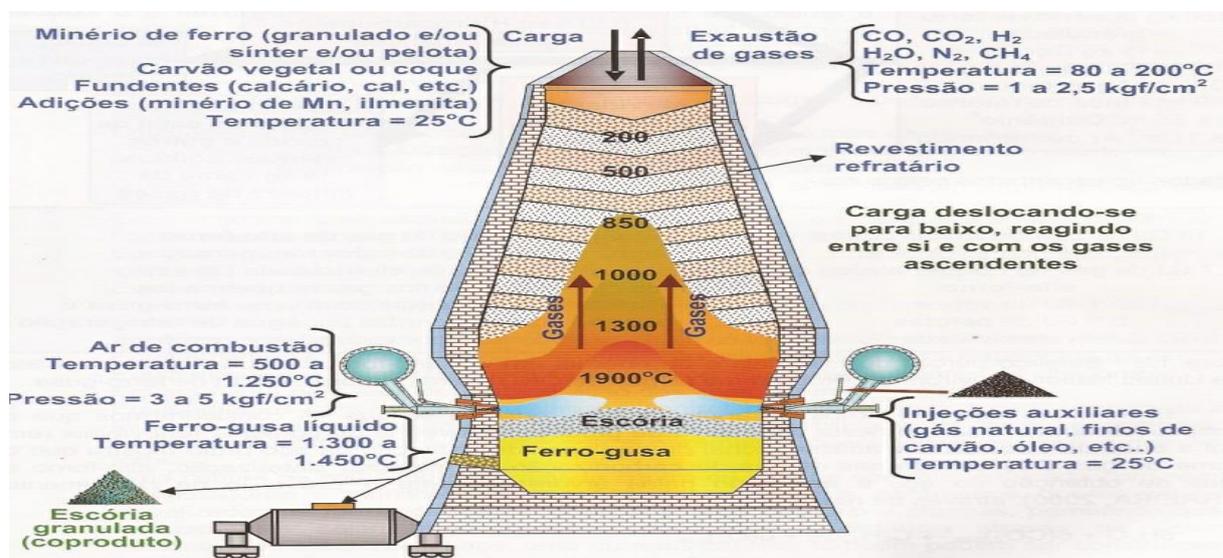


Figura 1: Processo simplificado de extração do ferro gusa. Fonte: Rizzo, 2009.

Como pode ser visto por meio da FIG. 1, no alto forno o ar aquecido é injetado a uma velocidade que chega a 280 m.s⁻¹, os regeneradores de calor elevam a temperatura do ar a aproximadamente 1300°C. O ar nessa temperatura é, então, enviado ao anel de vento e em seguida para as ventaneiras¹³. Logo após esse processo, o GAF é gerado, tendo em sua composição as porcentagens dos gases citadas na TAB. 1, o poder calorífico, que é a quantidade de energia liberada, pode variar entre 750 a 900 Kcal.m⁻³.

Metodologia

O presente artigo tem como metodologia o estudo de caso, pois é uma investigação que trata de um caso real¹⁴. A pesquisa foi realizada em uma indústria siderúrgica localizada no centro-oeste mineiro. A indústria possui 3 altos-fornos, porém apenas 2 em condição de operação, com capacidade produtiva de 20 mil ton/mês de gusa, nos dois altos-fornos. A caldeira é aquatubular, modelo VS-5030/2, projetada pela HPB com capacidade de geração de 30.000kg/h

de vapor superaquecido à temperatura de 350°C e pressão de saída de 34kgf/cm². A turbina modelo TCM 5000, fabricada pela TGM, possui potência nos bornes de 5000KW. Já o gerador é trifásico, fabricado pela WEG e tem capacidade de geração de 5,5 MWh. As análises foram realizadas utilizando-se o Microsoft Excel. Foram utilizados dados entre o período de janeiro a outubro de 2016, visto que a siderúrgica tem as operações interrompidas nos meses de novembro e dezembro, devido ao mercado de ferro gusa.

Indicador de Eficiência Global de Equipamento-OEE

O indicador OEE (*overall eficiente equipment*) ou indicador de eficiência global do equipamento teve origem no sistema de gestão TPM (Manutenção Produtiva total) que tinha como principal objetivo eliminar todas as perdas inerentes ao equipamento¹⁵. As perdas operacionais inerentes ao equipamento, podem se classificar como: i) perdas por paradas do equipamento; ii) perdas por velocidade reduzida de

operação; iii) perdas por qualidade¹⁶. A quantificação das perdas citadas ocorre por meio da Equação 1.

$$OEE = \text{Disponibilidade} \times \text{Desempenho} \times \text{Qualidade} \quad (1)$$

A disponibilidade representa a relação entre o tempo real de operação do equipamento e o tempo ideal, ou seja, o número de horas trabalhadas pelo número de horas que o equipamento deveria trabalhar¹⁷, conforme equação 2:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Total de Horas que o equipamento realmente trabalhou}}{\text{Nº de Horas que o equipamento deveria trabalhar}} \quad (2)$$

O desempenho representa a relação entre a quantidade efetivamente produzida por um equipamento em determinado período e a produção teórica, ou seja, em um sistema de cogeração quantidade de energia gerada em um intervalo de tempo, pela quantidade de energia que poderia ser gerada¹⁸, conforme equação 3.

$$\text{Desempenho} = \frac{\text{Quantos KWh gerados no intervalo de tempo}}{\text{Quantos KWh poderiam ser gerados}} \quad (3)$$

A qualidade representa a taxa de itens sem defeito em relação à produção total. No presente estudo, esse fator será considerado 100%, pelo fato de não haver possibilidade de reprocessamento de energia elétrica.

Resultado e discussão

Para a realização da análise do indicador OEE, far-se-á separadamente uma avaliação dos índices de disponibilidade e desempenho, com o intuito de facilitar a análise dos dados e visualizar a metodologia de cálculo que foi utilizada. O GRAF. 1 representa o cálculo da disponibilidade, levando em consideração as horas do calendário do alto-forno (total de horas no mês em análise) e as horas efetivas (horas que o alto-forno realmente esteve em operação).

Vê-se por meio do Graf. 1 a relação entre o índice de disponibilidade e o total de horas que a siderúrgica efetivamente esteve em operação, ou seja, quanto maior a proximidade entre o número de horas trabalhadas e a hora de calendário maior será o índice de disponibilidade.

O próximo passo do estudo foi o cálculo do desempenho. Após a coleta dos dados de produção de ferro gusa, mensurou-se através de instrumentos medidores de vazão, a quantidade de GAF gerada na siderúrgica em estudo, que nesse caso é 2.000 Nm³ para cada tonelada de ferro gusa produzido. Após

mensurar a quantidade de GAF gerada, multiplicou-se pelo PCI (poder calorífico inferior) que, neste estudo, foi considerado 750 Kcal/Nm³(valor medido) e pela eficiência do conjunto caldeira, turbina e gerador. Devido à dificuldade de mensurar a eficiência da planta siderúrgica, adotou-se eficiência de 25% conforme Maciel¹⁹, que realizou um estudo em uma siderúrgica semelhante chegando a esse índice. Após mensurar a energia gerada em Kcal, basta convertê-la em kwh, multiplicando por 1,16.10⁻³, assim como os dados de energia gerada e energia estimada, calcula-se o desempenho conforme equação 3. O GRAF. 2 apresenta o desempenho. Observa-se pelo Graf. 2 a quantidade de energia elétrica gerada em relação à quantidade de energia elétrica que é estimada para ser produzida, ou seja, o índice de desempenho da siderúrgica. Tendo calculado a disponibilidade e o desempenho e sabendo-se que a qualidade é 1, pois a energia gerada não pode ser reprocessada, pode-se calcular o indicador OEE.

Pode-se observar, no GRAF. 3, que o indicador OEE no sistema de cogeração analisado foi inferior a 80% durante todo o tempo analisado. A eficiência média foi de 50 %, ou seja, as perdas médias de produção foram superiores a 49% nesse período de operação. A disponibilidade média foi de 90% e o fator desempenho que mede as perdas por redução de velocidade de produção apresentou uma média de 54%.

Após mensurar o indicador OEE, o próximo passo foi realizar a análise das perdas de produtividade do sistema de cogeração. As perdas de produtividade observadas são causadas tanto por falhas no projeto quanto por paradas programadas e não programadas ou mesmo por redução de velocidade ao iniciar o processo de cogeração. O QUADRO 1 apresenta as perdas mais relevantes que foram detectadas durante o estudo suas respectivas causas.

Observa-se no QUADRO 1 as perdas que foram mais frequentes durante o estudo. Outras paradas, que aconteceram e não foram listadas no quadro, foram classificadas como outros fatores. O GRAF. 4 apresenta os tempos quantificados em hora de cada perda.

Observa-se no GRAF. 4 o total de horas que a siderúrgica deixou de produzir energia por parada durante o período de estudo. A falta de GAF foi a parada mais agravante, uma vez que a unidade de cogeração ficou parada por aproximadamente 360 horas devido a esse problema. No GRAF. 4, a pressão baixa pode ser classificada como perda de projeto, pois é inerente à deficiência dos equipamentos da siderúrgica e o religamento automático se deve ao número de horas que a siderúrgica ficou parada esperando para reiniciar o processo de produção de energia. A FIG. 2 apresenta o agrupamento das perdas no sistema de cogeração.

Análise das perdas de eficiência global em sistemas de cogeração utilizando indicador oee

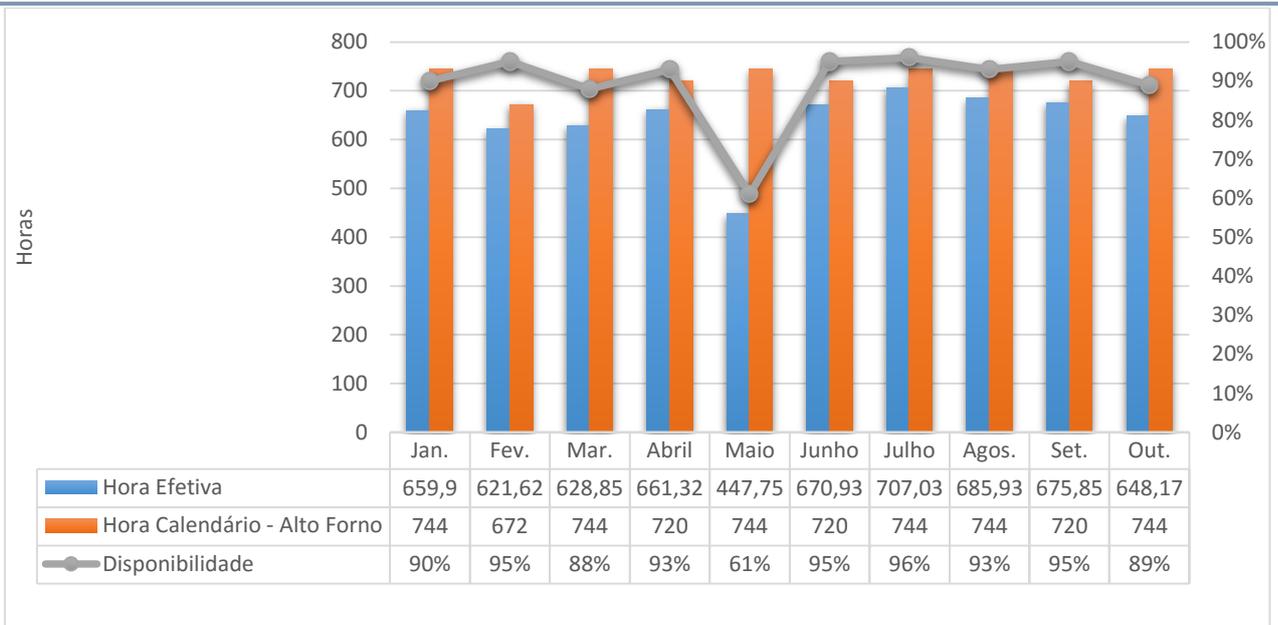


Gráfico 1: Horas calendário x Horas efetivas. Fonte: Dados da pesquisa, 2018

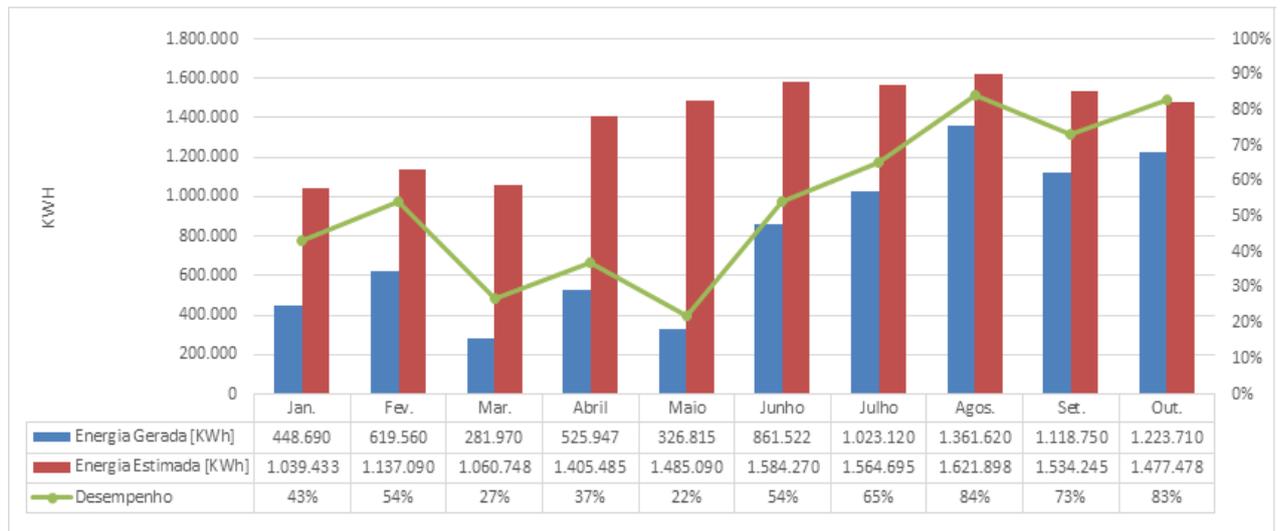


Gráfico 2: Energia gerada x Energia estimada. Fonte: Dados da pesquisa, 2018

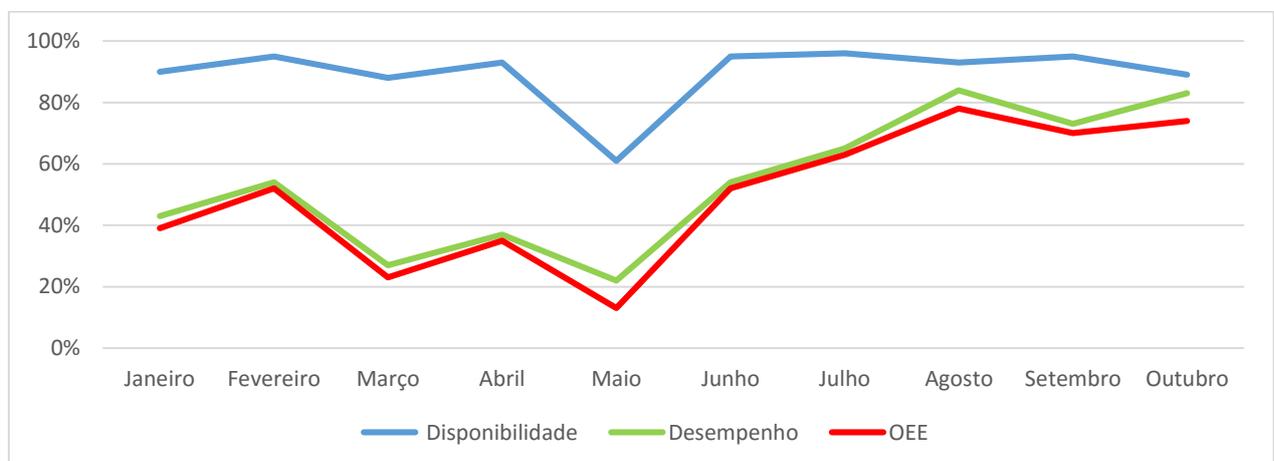


Gráfico 3: Indicador OEE. Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Análise das perdas de eficiência global em sistemas de cogeração utilizando indicador oee

Quadro 1 – Perdas no processo de cogeração.

Perda	Motivo
Falta de GAF	Devido à baixa pressão de gás na linha, a siderúrgica é forçada paralisar as operações. Essa baixa pressão na linha é causada por diversos fatores que podem ser: a) Tubulação muito obstruída em função da sujeira do gás; b) ineficiência do sistema de lavador de gás; c) falta do filtro prensa para retirar o excesso de material sólido contido no gás; e d) desvio de gás para os glendons superior à 70% da vazão total.
Paradas para limpeza de tubulação	Em detrimento do alto grau de sujeira no gás, se faz necessário parar o alto-forno aproximadamente 14 horas mensalmente para lavar a tubulação, contribuindo não somente com a eficiência da termelétrica, como também é alívio de pressão do topo do alto-forno.
Falta de matéria prima no alto-forno	Foi relatado que diversas vezes faltou matéria-prima tais como minério e carvão para o alto-forno.
Erro operacional	Como todo o sistema da siderúrgica é monitorado por CLP (Controlador Lógico Programável), em qualquer operação errada, ou que infrinja o sistema de segurança, dar-se-á um trip, ou seja, as operações são paralisadas de forma segura, para que se corrija o problema e se retorne a operação novamente.
Manutenção Programada	São realizadas anualmente paradas para inspecionar toda a caldeira, fazer teste hidrostático, aferir as válvulas de segurança, além de abertura da turbina para verificação da situação das palhetas
Manutenção não-programada	Causada por interferências no processo que não foram planejadas, como ajustes e troca de peças danificadas.
Perdas de Projeto	Paradas causadas devido à ineficiência do projeto, como um processo no vácuo de condensação da turbina, que interfere diretamente no fator desempenho.
Perdas por redução de velocidade	Perdas por “start” de equipamento que têm impacto na velocidade. Outro fator é a parada da siderúrgica no período de novembro a dezembro, o que acaba comprometendo o desempenho de janeiro por perdas de redução de velocidade.

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

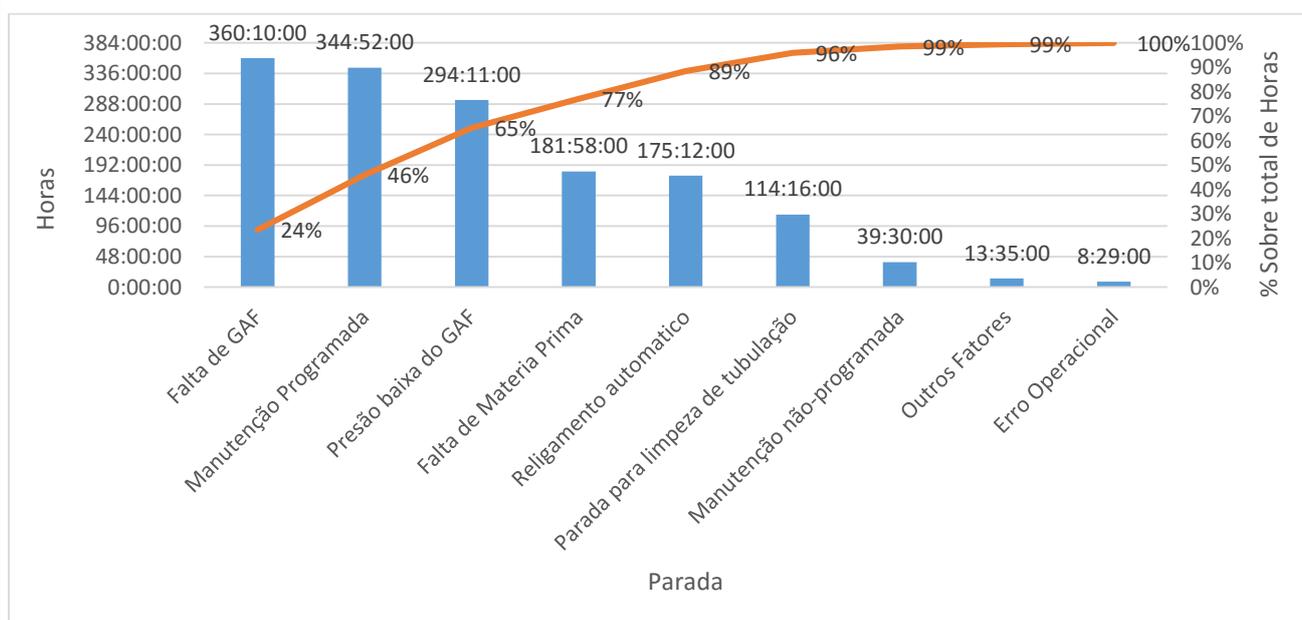


Gráfico 4: Evolução das paradas. Fonte: Dados da pesquisa, 2018

Combustíveis disponíveis para cogeração			
Perdas de Projeto 10%	Tempo disponível 90%		
	Perdas por parada do equipamento 34%	Tempo Operativo 56 %	
		Perdas por redução de velocidade 6%	Tempo operativo líquido 50%

Figura 2: Evolução das perdas do sistema de cogeração do estudo de caso. Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Vê-se na FIG. 2 as porcentagens referentes a cada perda do sistema de cogeração. Percebe-se que 10% das perdas são ocasionadas por deficiência no projeto das instalações da siderúrgica, 34% das perdas do indicador global de eficiência ocorrem devido a paradas do equipamento durante o processo de cogeração e 6% das perdas acontecem devido a problemas de redução de velocidade.

Conclusão

O objetivo do presente estudo foi aplicar e demonstrar como o indicador OEE pode ser utilizado como medidor de eficiência energética em centrais cogeradoras. O propósito do trabalho foi alcançado e a aplicação se deu em uma siderúrgica real. A siderúrgica do estudo de caso produz eletricidade utilizando o GAF, subproduto do processo de redução do ferro gusa.

A aplicação do indicador OEE como ferramenta de uma unidade cogeradora de energia demonstrou a possibilidade de aumento da produção, pois ficaram evidentes algumas perdas no processo: i) perda relacionadas ao projeto; ii) perdas relacionadas a redução de velocidade; iii) paradas para limpeza; iv) paradas para manutenção programada e não-programada; v) outras. Percebe-se que o uso do indicador tem alinhamento com o uso racional dos recursos energéticos, uma vez que a melhoria da eficiência global de unidades cogeradoras possibilitam uma redução de consumo de outras fontes de energia ou mesmo aumentaria a oferta destas.

Portanto conclui-se que o estudo atingiu o objetivo proposto de demonstrar a aplicação do indicador OEE em uma unidade cogeradora de energia, mostrando que o indicador contribui para um melhor entendimento do processo, além de permitir a identificação de diversas oportunidades de melhorias e a priorização mais racional dos recursos para melhorar os resultados.

Declaração de conflitos de interesses

Os autores do artigo afirmam que não houve nenhuma situação de conflito de interesse, tais como propostas de financiamento, emissão de pareceres, promoções ou participação em comitês consultivos ou

diretivos, entre outras, que pudessem influenciar no desenvolvimento do trabalho.

Referências

1. FIRJAN, **Federação das indústrias do Rio de Janeiro**. Disponível em: <http://www.quanto.custaenergia.com.br/>, acesso em 12 de fevereiro de 2018. 2015.
2. BALESTIERE, J.A.P. **Cogeração geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
3. SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2007.
4. VITORINO, F. **Preparação para a implementação do conceito TPM- Total Productive Maintenance na indústria Cimenteira**. Dissertação de Mestrado (Gestão e Estratégia Industrial) -Instituto Superior de Economia e Gestão, Lisboa, 2011.
5. CASTRO, D.E.; SILVEIRA, I.F. **Aplicação da Metodologia manutenção produtiva total para melhoria das condições operacionais das caldeiras**. **Congresso Nacional ABRAMAN**, Curitiba, 2011.
6. CASTRO, D.E.; PELEGRINI, C.C.; LISBOA, A.H.; PEDREIRA, S.M. **Análise das perdas de eficiência produtiva em sistemas de geração de energia eólica utilizando o coeficiente de Eficiência global OEE do TPM**. **Congresso Nacional ABRAMAN**, Bento Gonçalves, 2010.
7. SILVEIRA JUNIOR, J.R. **Análise de Eficiência global em sistemas de cogeração utilizando OEE e conceitos Termodinâmicos**. IN: 30º Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos, Campinas, 2015.
8. SILVEIRA JUNIOR, J.R. **Análise de Eficiência global em sistemas de cogeração utilizando OEE e conceitos Termodinâmicos**. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Energias) -Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

9. MAGALHÃES, E.O.; CARNEIRO, M.V. **Controle preditivo via MPC para distribuição otimizada de gases combustíveis**. IN: 18º Seminário de TI & automação industrial, 23 a 26 de setembro, São Paulo, SP, Brasil, 2014.
10. SALIERNO, Giovanni Felice. **Sistema de monitoramento do desempenho dos altos-fornos a carvão vegetal**. Ouro preto, 2007.
11. FERREIRA, M.J. **Estudo sobre o aproveitamento do gás de alto forno em uma Central de Cogeração de usina siderúrgica para produção de energia elétrica**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
12. ARAUJO, L.A. **Manual de Siderurgia: produção**. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 1996.
13. RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno**. São Paulo, 2009
14. YIN, R.K. **Estudo de caso: Planejamento e Métodos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
15. NAKAJIMA, S. **Introduce to TPM: Total Productive Maintenance**. Productive Press, Cambridge, 1989.
16. HANSEN, R.C. **Eficiência global dos equipamentos: uma poderosa ferramenta de produção/manutenção para o aumento dos lucros**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
17. MUCHIRI, P., PINTELON, L. Performance Measurement using Overall Equipment Effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, vol.46, nº13, pp. 3517-3535, 2008.
18. CABRAL, J. **Organização e Gestão da Manutenção**. 3ª ed, Lidel: Lisboa, 1998.
19. MACIEL, C.R.F. **Análise Energética e exegética de uma central Termelétrica**. Dissertação de Mestrado (Ciências em Engenharia Mecânica)- Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.