

VIABILIDADE ECONÔMICA DE SUBSTITUIÇÃO ENERGÉTICA PARA AQUECIMENTO DO ÓLEO COMBUSTÍVEL EM UMA TERMELÉTRICA NO NORDESTE BRASILEIRO

Luiz Moreira Coelho Junior – luiz@cear.ufpb.br

Beatriz Ribeiro Petrucci Padilha

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Energias Alternativas e Renováveis

Roberto Castro

Dorel Soares Ramos

MRTS Consultoria em Engenharia

João Carlos de Oliveira Mello

Victor Hugo Ribeiro dos Santos

Thymos Consultoria

Renato Barros Pinheiro

Wilton Lima Souza

EPASA – Centrais Elétricas da Paraíba

Resumo. A atuação das usinas termelétricas do Brasil serve como mecanismo de segurança energética nacional, complementando e atendendo períodos com menor disponibilidade de oferta interna de eletricidade. Quando as usinas termelétricas a óleo combustível não estão em operação, necessitam manter o óleo aquecido e para isso utilizam caldeiras e outras alternativas para aquece-lo. Por meio do estudo de caso em uma termelétrica na Paraíba, analisou-se comparativamente a viabilidade econômica de uma caldeira a gás natural e um sistema de aquecimento solar de média temperatura do tipo Fresnel. Os indicadores de viabilidade econômica utilizados foram: Valor Presente Líquido (VPL), Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) e Custo Nivelado de Energia (Levelized Cost Of Electricity – LCOE). A partir do investimento inicial da caldeira de R\$ 1.148.679,82 e dos coletores solares de R\$ 10.781.417,00. Para um horizonte de planejamento de 25 anos, a caldeira a gás natural demanda anualmente de investimento em combustível, operação e manutenção, enquanto o sistema solar Fresnel só necessita dos custos de operação e manutenção. O sistema de coletores solar possui um custo total de R\$ 9.433.739,75 e evidencia-se um encarecimento da caldeira a gás natural, obtendo um custo total de R\$ 55.651.069,86. Para uma TMA de 11,15% a.a., o VPL da caldeira a gás natural foi de - R\$ 11.744.986,77 e o VPL do sistema do sistema Fresnel foi de - R\$ 19.378.135,03. O CAUE da caldeira a gás natural foi de R\$ 2.326.205,26 e o CAUE do sistema do sistema Fresnel foi de R\$ 1.409.900,90. O LCOE mais preferível foi o do sistema Fresnel de 0,07193 R\$/kWh.

Palavras-chave: Termelétrica, Engenharia econômica, Análise de substituição de equipamentos.

1. INTRODUÇÃO

O panorama do setor elétrico brasileiro, indica uma forte influência de usinas termelétricas (UTE), as quais consistem na produção de energia a partir do calor obtido da queima de combustíveis fósseis ou fissão nuclear. Na perspectiva nacional, essas usinas são utilizadas estrategicamente para suprir a necessidade energética, tendo em vista que sua produção é constante em qualquer período do ano (LIMA; SOUZA, 2015). A UTE funciona com base na conversão de energia térmica em mecânica e elétrica. Essa conversão é dependente de um fluido que produz trabalho na etapa de expansão em turbinas térmicas ou motores a combustão. A queima do combustível gera energia mecânica que é convertida em elétrica por meio de um de um gerador elétrico acoplado ao equipamento mecânico (ALVES FILHO, 2003).

As usinas termelétricas que utilizam combustíveis fósseis no seu processo de geração geralmente optam pelos óleos combustíveis derivados do petróleo, em razão do seu baixo custo, boa eficiência e facilidade de armazenamento. O óleo combustível pesado (HFO) é o produto residual da destilação a vácuo no processo de refino do petróleo e um dos óleos combustíveis com capacidade de geração mais utilizados em UTEs, devido as suas propriedades ajustáveis (LOURENÇO, 2019). No Brasil existem 41 UTEs a óleo diesel ou óleo combustível registrados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), totalizando 3,9 GW.

Com base no princípio existente em usinas termelétricas, que consiste na produção constante de energia para que exista uma disponibilidade de fornecimento de energia a qualquer momento, isto é, de forma intermitente. É válido destacar a presença de sistemas de caldeiras a gás natural ou biomassa presentes em UTEs, atuando como fonte energética que mantem o óleo combustível aquecido e disponível para funcionamento quando a termelétrica não estiver em operação.

O panorama abordado permite um estudo da aplicação industrial de energia solar térmica para substituição das caldeiras. Os concentradores solares de média temperatura conseguem atingir a mesma temperatura utilizada nas caldeiras para aquecer o óleo combustível. Sua tecnologia consiste em empregar lentes ou espelhos com o objetivo de concentrar a radiação solar e dessa maneira atingir altas temperaturas em um fluido de trabalho (SHARMA et al., 2017). Por meio do exposto, a aplicação industrial de energia solar térmica com concentradores solares de média temperatura propõe a substituição da fonte energética que aquece o óleo combustível em uma termelétrica e mantém sua disponibilidade.

A técnica de indicadores econômicos estuda a possibilidade de efetuar a mudança energética através de comparações entre sistemas. Sendo assim, as peculiaridades técnicas e econômicas dos sistemas de caldeira a gás natural e sistema solar solar Fresnel, estabelece os parâmetros de custo e as especificidades dos equipamentos. Na viabilidade econômica, efetua-se os cálculos relacionados ao Valor Presente Líquido (VPL), Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) e Custo Nivelado de Energia (Levelized Cost Of Electricity – LCOE), com a finalidade de determinar a tecnologia que possui uma melhor viabilidade para investimento.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aplicações industriais do gás natural

A partir de uma perspectiva energética, analisa-se o gás natural como sendo o combustível fóssil mais limpo e seguro, localizado na natureza em acumulações de rochas porosas no subsolo. Sua composição indica uma mistura de hidrocarbonetos leves no estado gasoso sob condições normais de temperatura e pressão (SANTOS et al., 2002). No contexto nacional, a Petrobras é a empresa protagonista por toda cadeia produtiva do gás natural, a qual consiste na produção, processamento, transporte e distribuição. Essa dominância, caracteriza um mercado concentrado em todas as etapas da cadeia. Além disso, também é importante ressaltar, os entraves regulatórios em todo o processo, principalmente no que tange a distribuição e infraestrutura envolvida. Devido a esses fatores, quando colocado em uma análise comparativa, o gás natural brasileiro se apresenta como um dos mais caros para consumidor industrial, com preço equivalente a US\$ 14/MMBtu (BRASIL, 2019).

A atuação do gás natural na matriz energética brasileira apresenta dois momentos. O primeiro refere-se a primeira metade do século XX, a qual destaca o gás em uma posição restrita e desprezível. Entretanto, o segundo momento é marcado pela crise energética dos anos 70, esse fato impulsionou o uso do gás natural por países menos industrializados como uma fonte de energia privilegiada e estratégica. Desde então essa fonte vem se desenvolvendo e crescendo gradativamente no Brasil, como uma demanda considerável no setor industrial. O enfoque para a indústria do gás natural é reforçada novamente no Brasil devido à crise de eletricidade em 2001, desse modo o gás participa como combustível da produção de eletricidade, diminuindo a dependência hidrelétrica (EPE, 2007).

A aplicação do gás natural nas indústrias pode dar-se no sentido de insumo energético, substituindo por exemplo o óleo diesel, lenha, carvão, óleo combustível e energia elétrica. Além disso, outra função proveniente do gás natural é a de matéria prima na indústria química e petroquímica, onde o principal objetivo é a produção de metanol e fertilizantes nitrogenados. Por outro lado, quando ambientado em siderúrgicas, o gás natural é associado a produção do aço, uma vez que é aplicado como redutor na produção de ferro-esponja (MARTINS, 2006).

No que diz respeito a função de combustível, o gás natural possui vantagens por ser o combustível fóssil com a combustão mais limpa, logo ideal para os setores que exigem processos de queima em contato direto com o produto final, tais quais necessitam as indústrias de cerâmica, cimento e produção de vidro. Desse modo, no Brasil o gás natural como insumo energético é atrativo em indústrias de fornecimento de calor, geração de eletricidade e força motriz. Tendo em vista que quanto a geração de energia térmica e força motriz nas indústrias, o gás natural representou um volume de 28,8 milhões m³/dia em 2018. E no setor elétrico, para a autoprodução de energia elétrica nas indústrias, o volume de gás natural apresentado em 2018 é bem inferior em relação ao primeiro caso, de 1,48 milhão m³/dia. Esses dados determinam uma preferência do setor industrial em destinar o gás natural para geração térmica (BNDES, 2020).

O gás natural presente na indústria química e petroquímica como matéria prima, atua na produção indireta de fertilizantes e de petroquímico, além de ser o único ambiente industrial que este gás não é designado totalmente para consumo energético quando se trata do contexto nacional. O gás natural como matéria prima destacou um consumo em 2018 de 1,8 m³/dia (BNDES, 2020).

2.2 Aplicação industrial da energia solar térmica

O Sol é uma fonte inesgotável de energia intrinsecamente relacionado com a vida na Terra. Sendo assim, quando se trata da energia emitida pelo Sol na Terra, destaca-se o balanço de radiação envolvido. Do total de radiação solar que incide no planeta, 30% é refletida imediatamente de volta para a atmosfera, enquanto 70% restante são destinadas para o aquecimento da superfície da Terra, atmosfera e oceanos ou são absorvidos na evaporação da água. A parcela destinada a superfície terrestre, utiliza o conceito de energias renováveis derivada do sol que pode ocorrer de forma direta para geração de eletricidade ou para fins de aquecimento. Portanto, a variável de aproveitamento em equipamentos que necessitam da energia solar é a radiação solar incidente no local (REIS; FADIGAS, 2016).

A aplicação da energia solar pode acontecer de maneira passiva ou ativa. De forma que a energia ativa representa a geração de energia elétrica por meio do aproveitamento da energia solar oriunda de painéis fotovoltaicos e aplicações

térmicas por meio de painéis planos e concentradores. Por outro lado, a energia passiva utiliza a energia solar como iluminação, ou seja, uso arquitetônico da energia solar (PEREIRA et al., 2003).

O atual cenário brasileiro apresenta a inserção de energias renováveis no setor industrial como uma possibilidade viável para substituição das energias não renováveis por fontes de energias alternativas. Desta forma, por meio do plano decenal de expansão de energia 2029, desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o qual tem como objetivo indicar as perspectivas da expansão do setor de energia no horizonte de dez anos. No referido documento identificou-se que em termos de consumo de energia, o setor industrial tende crescer a taxa de 2,6% ao ano e cada vez mais reduz a participação de fontes oriundas de combustíveis fósseis, tais como gás natural e carvão mineral, e agrega fontes que reduzem os impactos ambientais (EPE, 2019).

Na análise do Balanço Energético Nacional, documento de relevante importância para investigação na área em pauta, pois o mesmo tem como finalidade contabilizar e divulgar extensa pesquisa relativa à oferta e consumo de energia no Brasil. A indústria correspondeu com uma participação de 30,4% do consumo de energia do país, de tal modo que apresentou uma efetiva atuação de energia renovável, a qual confere 58% (BEN, 2020). A energia solar térmica como fonte renovável participou do setor industrial, em condições de aquecimento de fluidos entre outros processos industriais. Com base nos estudos de Pereira et al. (2017), proposto no Atlas Brasileiro de Energia Solar, a energia solar é capaz de produzir calor de forma imediata para o setor industrial, entretanto essa tecnologia ainda não é efetivamente aplicada. O calor em questão pode ser solicitado em diversas temperaturas, tanto em forma isolada quanto em diferentes temperaturas associadas para um mesmo sistema. Portanto, a complexidade da aplicação industrial da energia solar irá variar de acordo com a estrutura vigente. Os coletores solares são os mecanismos de captação da energia solar térmica. A escolha da tecnologia do coletor específico é essencial para uma melhor eficiência energética. Então, essa tomada de decisão considerou os aspectos técnicos e econômicos do sistema (ALLOUHIA et al., 2017).

2.3 Viabilidade econômica de projetos

A engenharia econômica consiste em verificar os benefícios relacionados a um investimento e os custos associados ao mesmo, com o propósito de estudar a viabilidade de efetivação. A análise de viabilidade econômica de projetos, é portanto, uma forma de averiguar todas as atividades desenvolvidas pela engenharia econômica. Essa análise de investimentos reúne um conjunto de técnicas, as quais possibilitam o estudo comparativo entre os resultados de tomada de decisões a partir das alternativas presentes (ZAGO; WEISE; HORNBURG, 2009).

Os indicadores de avaliação de projetos norteiam o investidor a melhor alternativa para aplicar seus recursos. Nessa seção, é visto três métodos de análise: o Valor Presente Líquido (VPL); o Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) e o Custo Nivelado de Energia (Levelized Cost Of Electricity – LCOE). Conforme Casarotto Filho & Kopittke (2020) “O VPL é utilizado para análise de investimentos isolados que envolvam o curto prazo ou que tenham baixo número de períodos, de sorte que um valor anual teria pouco significado prático para uma tomada de decisão”. Ainda sob a perspectiva de Casarotto Filho & Kopittke (2020) o Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) é o parâmetro que determina uma série uniforme anual correspondente a todos os custos e receitas para um projeto baseando-se na Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Para o caso estudado, o CAUE que indica o melhor investimento é o que representa o menor valor, tendo em vista que este propõe menor custo durante a vida útil. O critério do Custo Nivelado de Energia (Levelized Cost Of Electricity – LCOE) indica o custo de geração de energia. Através deste é possível comparar diferentes sistemas de energia, de modo que o cálculo do LCOE abrange os parâmetros de instalação, financiamento, operação e quantidade de energia produzida durante a vida útil (MIRANDA, 2013).

3. METODOLOGIA

3.1 Características técnicas e econômicas da caldeira a gás natural

A principal função da caldeira é manter o óleo combustível aquecido nos momentos em que a termelétrica em questão não estiver em operação. Portanto, a caldeira auxilia a cumprir o princípio das termelétricas, no que tange a disponibilidade intermitente de energia elétrica, promovendo uma melhor segurança energética. A percepção obtida pelas caldeiras auxiliares Aalborg 3-PASS a gás natural da marca Aalborg e modelo 4 utilizadas na termelétrica possui importantes especificidades apresentadas na Tab. 1 que deverão ser levadas em consideração para diagnóstico do estudo em questão.

A caldeira flamotubular Aalborg 3-PASS é de fácil instalação e possui queimador, painel de controle, acessórios e cabos já montados. Para seu uso a gás natural, utiliza-se um queimador específico. Na estrutura da caldeira há uma disposição simétrica entre as superfícies de aquecimento e a fornalha na linha central da caldeira com o objetivo de otimizar a circulação do fluido. Nessa situação, os gases de combustão são resfriados a água antes de entrar na câmara de reversão. Além disso, existem fornos que suportam altas pressões e baixas pressões (ALFA LAVAL, 2021). Quanto ao sistema de controle, a caldeira estudada abrange: sistema de gerenciamento de queimadores com controle de carga e sequência; controle de nível de água e equipamentos de segurança; acionadores de motor e aquecedor de óleo (ALFA LAVAL, 2021). As características econômicas da caldeira encontram-se na Tab. 2. O investimento inclui a caldeira Aalborg 3-PASS tipo 4, chaminé, despesas do técnico e todos os acessórios. O frete agregado ao valor do investimento equivale ao investimento inicial, que é representado pelo tempo 0. Ao longo da vida útil da caldeira é necessário

manutenções e operações anuais, além dos gastos com o combustível que variam de acordo com as tarifas da PBGÁS. Para o estudo em questão foi utilizado um valor médio dos últimos anos como parâmetro da matéria prima.

Tabela 1 – Características técnicas da caldeira.

Parâmetro	Unidade	Valor
Combustível auxiliar	-	Gás natural
Pressão de operação	kgf/cm ²	8,5
Superfície de aquecimento	m ²	91,7
Capacidade de produção de vapor	kg/h	4000
Consumo máximo de gás natural ^a	Nm ³ /h	314
Potência	MW	3,30
Eficiência ^a	%	± 85
Vida útil	Anos	25

Fonte: Aalborg^a (2021).

Tabela 2- Características econômicas da caldeira Aalborg com 4000 kg/h.

Parâmetro	Unidade	Tempo	Valor
Investimento	R\$	0	1.148.679,82
Frete	R\$	0	100.000,00
Matéria Prima (Gás Natural) ^b	R\$/m ³	1, 2,... , 25	2,522227
Manutenção (O&M)	R\$	1, 2,... , 25	11.486,80
Valor residual	R\$	25	574.339,91
Consumo médio anual de Gás Natural	m ³	1, 2,... , 25	832.049

Fonte: PBGÁS^b (2019).

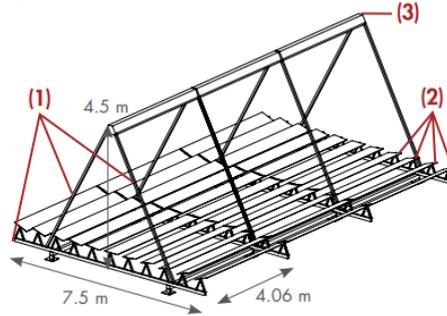
3.2 Características técnicas e econômicas da termossolar

Conforme a Tab. 3, segue as características técnicas do coletor Fresnel LF-11, fornecido pela empresa Industrial Solar, para operar com segurança e utilizar componentes de alta qualidade que favorecem o rendimento do sistema, de acordo esquema da Fig. 1. As características ópticas desse modelo de coletor solar, a eficiência referente a situação do sol no zênite é $\eta_0 = 0,686$ e o rendimento para o sol em ângulo zenital transversal de 5° é $\eta_{\max} = 0,709$ (INDUSTRIAL SOLAR, 2019). O desempenho térmico do equipamento é relacionado com o tubo à vácuo de absorção e independente da velocidade do vento. Deste modo, considerando a temperatura ambiente de 30 °C, a temperatura de entrada de 160 °C, a temperatura de saída de 180 °C, a radiação direta normal de 900 W/m², o ângulo azimutal de 90° e o ângulo zenital de 30°. Foi possível indicar que a temperatura máxima de atuação é de até 400 °C e a saída térmica é 13,82 kW por módulo padrão, 601 W/m² em termos de área de superfície de abertura de refletores primários e 454 W/m² em termos de área total de instalação (INDUSTRIAL SOLAR, 2019).

Tabela 3 – Características técnicas do modelo Fresnel LF-11.

Parâmetro	Unidade	Valor
Largura do módulo	m	7,5
Comprimento do módulo	m	4,06
Superfície de abertura dos refletores primários	m ²	23
Superfície do solo de um único módulo	m ²	30,45
Altura do receptor acima do refletor primário	m	4
Altura do refletor primário acima do nível do sólido	m	0,5
Espaço mínimo entre filas paralelas	m	0,2
Peso específico	kg/m ²	26,2
Velocidade máxima do vento operacional	km/h	100
Velocidade máxima do vento na posição retraída	km/h	180
Vida útil	anos	25

Fonte: Industrial Solar (2019).

Figura 1 – Esquema do coletor Fresnel LF-11

Legenda: 1- Estrutura; 2- Refletor primário; 3- Receptor: refletor secundário e tubo de absorção.
Fonte: Industrial Solar (2019).

No aspecto econômico, o investimento apropriado para uma demanda de 1 MW foi 900.000 € e o custo de operação e manutenção anual ideal foi 1,5% do valor empregado no investimento inicial, portanto 13.500 €/ano (INDUSTRIAL SOLAR, 2021). Tendo em vista que os valores referenciais foram dados em Euro, foi necessário efetuar a conversão para a moeda de Real, sendo assim admitiu-se o euro comercial no valor de R\$ 4,3738, de acordo com a Receita Federal e o período base sendo março de 2019 (BRASIL, 2021).

3.3 Indicadores de avaliação econômica de projetos

No cálculo de VPL, Eq. (1), é analisada movimentação de um fluxo de caixa, onde todos os valores obtidos são trazidos para data presente da investigação e adicionado o investimento inicial. Assim, o VPL é o somatório de todas as despesas e receitas no tempo t e aplicado a uma taxa de desconto. (SILVA; ALVES, 2018).

$$VPL = \left(\sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t} \right) - I_0 \quad (1)$$

Em que, I_0 é o investimento inicial, i é a taxa de desconto, Taxa Mínima de Atratividade (TMA), no período t (anos); FC é fluxo de caixa, que consiste na diferença da receita e despesa, no período t (anos). O cálculo do CAUE é intrinsecamente relacionado com o cálculo do VPL e é um critério mais utilizado para um grande intervalo de tempo. No CAUE efetua-se uma série anual uniforme e compara os fluxos de caixa, ou seja, as receitas e despesas, dos investimentos descontados a TMA.

$$CAUE = VPL \times \left(\frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \right) \quad (2)$$

Após dimensionar o VPL e do CAUE, foi realizado a análise de sensibilidade como as seguintes TMA's: 4%, 6%, 8%, 10% e 11,15%. Posteriormente, o critério que verifica o custo de geração de energia na unidade de R\$/kWh é o Custo Nivelado de Energia (Levelized Cost Of Electricity – LCOE). Na equação seguinte, as incógnitas I, M e F representam CAPEX, manutenção e gastos com combustível respectivamente, o r representa a TMA, t se refere ao tempo, n é a vida útil e E significa a energia gasta no sistema durante o período analisado em kWh.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I + M + F}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caldeira a gás natural

A potência da caldeira é estabelecida a partir do dado de consumo máximo do gás natural de 314 Nm³/h e foi convertido para unidade de MJ/h encontrando o valor de 11.878 MJ/h que equivale a 3,30 MW. A caldeira a gás natural nesse projeto foi instalada na termelétrica estudada no ano de 2019, desde então opera aquecendo o óleo combustível HFO a uma temperatura de até 200 °C. Seu fluxo de caixa é composto pelo investimento no sistema, manutenção e consumo do gás natural durante o período de 25 anos, equivalente a vida útil. A partir desse fluxo de caixa são analisados os parâmetros econômicos de VPL, CAUE e LCOE. O fluxo de caixa indica um investimento inicial no valor de R\$ 1.248.679,82, entre os anos 1 e 25 há custos com manutenção e com o gás natural, o qual varia conforme a tarifa vigente. Nos primeiros anos foi possível definir a tarifa exato e nos anos posteriores estabeleceu uma média tarifária. Além desses gastos, no último ano de vida útil há uma subtração do valor residual da caldeira.

4.2 Sistema de aquecimento solar Fresnel para

A geração de energia térmica no modelo de coletor solar Fresnel LF-11 linear pode produzir calor entre a faixa de 500 kW a 30 MW, a pressões de até 120 bar e atinge até 400 °C. Sendo assim, os coletores solares apresentam capacidade de substituir as caldeiras auxiliares por atuarem à temperaturas requeridas no processo de até 200 °C e executarem o mesmo trabalho das caldeiras, que consiste em gerar vapor e aquecer o óleo combustível. Contudo, os dados expostos evidenciam que esses coletores possuem um alto custo em decorrência de ser uma tecnologia pouco explorada no Brasil, implicando em importações de materiais e serviços.

A análise fornece informações acerca do funcionamento dos 240 módulos de coletores solares Fresnel LF-11 para 3,30 MW, localizados em João Pessoa, Paraíba, em termos de geração de vapor (ton/h) e potência (kW_{th}) durante um dia, utilizando o parâmetro de melhor dia, um dia de primavera e outro de inverno. A partir desse panorama, o coletor solar Fresnel gera uma quantidade de vapor por ton/h equivalente e superior à da caldeira, que gera 4 ton/h. Quanto a potência do coletor, foi possível destacar um ótimo desempenho na primavera e no melhor dia de incidência solar, indicando uma potência superior a 3,30 MW. Entretanto, o desempenho no inverno foi inferior a este de referência, o que já era esperado, tendo em vista que nessa estação a incidência solar diminui e influencia no desempenho do coletor solar.

A área de terreno utilizada para esse cenário foi cerca de 8.280 m², que contempla a área de espelho de 5.520 m² ocupada por 240 módulos, dispostos na seguinte forma: 10 string (linhas de placas) e 24 módulos por string. Que nesse caso formarão um sistema com eficiência de $\pm 51,80\%$ (INDUSTRIAL SOLAR, 2021). A usina termelétrica estudada possui uma área livre em torno de 19.400 m² com a possibilidade de designar uma parte para operação dos módulos. No critério econômico, conforme a Industrial Solar (2021), é necessário um investimento em tecnologia Fresnel de 2,465 milhões € FOB para suprir a demanda de 3,30 MW da caldeira utilizada na termelétrica. Esse valor engloba os módulos coletores, serviço, componentes hidráulicos, sensores, armazenamento, estação de pressurização, estação de transferência de calor e fatores de mão de obra local. Logo, o custo para 3,30 MW foi R\$ 10.781.417,00 e o custo de operação e manutenção foi R\$/ano 161.721,25, além disso, no último ano a operação e manutenção é subtraída do valor residual e resulta no valor de R\$ 5.228.987,25, o valor residual refere-se ao valor de um patrimônio após a sua vida útil.

4.3 Análise de viabilidade econômica de substituição de equipamento

A verificação da viabilidade econômica, por meio dos cálculos de VPL, CAUE e LCOE, foi realizada a partir dos dados expostos na Tab. 4, a qual contém os dados referentes à caldeira à Gás Natural e ao coletor solar do modelo linear Fresnel.

Tabela 4 – Custos da Caldeira à Gás Natural e da Tecnologia Linear Fresnel ao longo de 25 anos.

Parâmetro	Caldeira (R\$)	Fresnel (R\$)
Investimento	-1.148.679,82	-10.781.417,00
Frete	-100.000,00	-
Combustível	-54.689.559,99	-
Manutenção (O&M)	-287.169,96	- 4.043.031,38
Vida útil	25 anos	25 anos
Valor residual	574.339,91	5.390.708,50
Custo Total	-55.651.069,86	-9.433.739,75

Os elementos expostos na tabela acima indicam que ambos os sistemas estudados possuem uma mesma vida útil de 25 anos, esse dado foi significativo nos estudos de viabilidade econômica para efetuar os cálculos especificados anteriormente. Além disso, essa tabela confirmou o fato do sistema Fresnel possuir um alto investimento, em decorrência de ser uma tecnologia nova e em disseminação no Brasil. Tendo em vista que o custo de Operação e Manutenção está atrelado ao valor referente ao investimento, cerca de 1,5% ao ano do investimento para o sistema Fresnel e cerca de 1,0% ao ano do investimento da caldeira, é esperado que em 25 anos o sistema Fresnel tenha gastado mais com manutenção, como está explícito na Tab. 4.

Quanto ao parâmetro de matéria prima, foi notório um custo associado a caldeira, em torno de R\$54.689.559,99 para aquisição do Gás Natural. Em contrapartida, o coletor solar da linha Fresnel não necessita de nenhum custo relacionado à matéria prima, uma vez que depende da luz solar. Desse modo, essa questão evidencia um lado economicamente positivo dos coletores Fresnel. A análise de sensibilidade do VPL e do CAUE de acordo com as TMA's propostas é apresentado na Tab. 5. O VPL foi negativo nos dois sistemas para todos os parâmetros de TMA, de forma que com o aumento da TMA o VPL do Fresnel torna o valor mais negativo e o VPL da caldeira torna o valor menos negativo. O VPL negativo significa altas despesas em comparação com as receitas, indicando inviabilidade de projetos. Todavia, nesse caso, a análise do VPL observou de fato todas as despesas para ambos os sistemas, tornando provável o resultado negativo constatado na tabela. Diante do exposto, a TMA mais apropriada para o Fresnel é 4% e para a caldeira é 11,15%, pelo fato de representarem menos despesas. Por outro lado, o CAUE foi positivo e aumentou em ambos os

sistemas e para todos os parâmetros de TMA. Nessa perspectiva, o Custo Anual Uniforme Equivalente proporcionou os custos anuais ao longo da vida útil de 25 anos para as duas tecnologias e propôs como critério de decisão o sistema de menor custo. Sendo assim, observa-se na Tab. 6 que em todas TMA, o Refletor Fresnel Linear apresentou um custo menor em relação a caldeira à Gás Natural, comprovando que a melhor viabilidade para o projeto é a implantação de sistemas Fresnel.

Tabela 5 – Análise de sensibilidade do VPL e CAUE, para a caldeira e cole...

TMA	Caldeira		Coletor Fresnel	
	VPL	CAUE	VPL	CAUE
4%	- R\$ 35.293.878,88	R\$ 2.259.230,46	- R\$ 11.285.693,96	R\$ 722.419,42
6%	- R\$ 29.108.271,46	R\$ 2.277.044,55	- R\$ 11.592.729,64	R\$ 906.861,19
8%	- R\$ 24.505.121,30	R\$ 2.295.609,84	- R\$ 11.720.615,19	R\$ 1.097.972,92
10%	- R\$ 21.012.056,65	R\$ 2.314.857,77	- R\$ 11.751.826,44	R\$ 1.294.676,06
11,15%	- R\$ 19.378.135,03	R\$ 2.326.205,26	- R\$ 11.744.986,77	R\$ 1.409.900,90

Tabela 6 – Cálculo do LCOE para Caldeira e Fresnel LF-11

Parâmetro	Unidade	Caldeira	Fresnel LF-11
Custo Total em 25 anos	R\$	55.651.069,86	9.433.739,75
Produção de energia em 25 anos	kWh	131.150.000	131.150.000
LCOE	R\$/kWh	0,4243	0,07193

Quanto ao parâmetro do LCOE, que estuda o custo por energia produzida. É possível destacar por meio da Tab. 6 que durante a vida útil o custo para produção de energia na caldeira é maior em relação ao sistema de aquecimento Fresnel. Essa diferença apontada é resultante do consumo de gás natural durante os 25 anos que é inserido na conta do LCOE da caldeira. Em contrapartida, a tecnologia Fresnel não engloba em seu cálculo do LCOE nenhum gasto com combustível, tornando-o favorável.

5. CONCLUSÃO

A análise de viabilidade econômica de substituição energética para aquecimento do óleo combustível em uma termelétrica foi estudada com base em alguns critérios. A princípio, as verificações a respeito da atuação dos coletores solares em aplicação industrial e da atuação do gás natural em usinas termelétricas, constatou a possibilidade de substituição de um modelo de caldeiras a gás utilizadas em uma termelétrica no Brasil por coletores solares do modelo Fresnel.

No que tange o parâmetro de viabilidade econômica, o presente trabalho utiliza o levantamento de custos citado para o sistema de caldeiras e Fresnel, e por meio desses são efetuados os cálculos de Valor Presente Líquido (VPL), Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) e Custo Nivelado de Energia (Levelized Cost Of Electricity – LCOE). Os cálculos de VPL e CAUE são acompanhados de uma análise de sensibilidade, avaliando-os a uma Taxa Mínima Anual de 4%, 6%, 8%, 10% e 11,15%. Desse modo, o cálculo de VPL que representa menos despesas no modelo Fresnel possui uma TMA de 4% e no sistema de caldeiras essa TMA é 11,15%. Quanto aos resultados obtidos no CAUE, é possível concluir que no intervalo de tempo de 25 anos o menor custo é o do sistema de coletores solares de tecnologia Fresnel, logo o mais viável. Por outra vertente de análise, o LCOE analisa o melhor custo por produção de energia durante a vida útil, através dos critérios de custo total e produção de energia pelos sistemas, o LCOE mais favorável foi o do sistema Fresnel de 0,07193 R\$/kWh.

Através desta pesquisa, é percebido a importância desses cálculos de análise econômica, tendo em vista que apesar do alto investimento empregado na tecnologia Fresnel, ela deve ser examinada em torno dos seus anos de vida útil, uma vez que durante esses anos o custo é apenas com operação e manutenção. Por outro lado, o sistema de caldeiras possui um baixo investimento inicial comparado ao Fresnel, mas depende de custos anuais referentes ao gás natural, o que provoca o encarecimento ao longo dos anos e sua inviabilidade. Portanto, conclui-se que o estudo de substituição de uma fonte energética não renovável por uma renovável é viável técnica e economicamente, além de ser atrativo no quesito ambiental pelo baixo índice de poluição.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do programa de P&D da ANEEL através do projeto iniciado em 08/04/2020, intitulado: O futuro das UTEs a óleo no setor elétrico brasileiro: Uma análise visualizando a integração massiva de fontes renováveis intermitentes e os recursos sistêmicos para viabilizar a operação segura do SIN – PD-07236-

0008/2020, proposto pela EPASA – Centrais Elétricas da Paraíba S.A. a quem as executoras agradecem a confiança, apoio e cooperação.

REFERÊNCIAS

- AALBORG. Catálogo Caldeiras. 2021. Disponível em: <http://aalborg-industries.com.br/downloads/catalogo-caldeiras-aalborg.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- ALLOUHIA, A.; AGROUZA, Y.; AMINEC, M. B.; REHMANN, S.; BUKERE, M. S.; KOUSKSOU, T.; JAMILA, A.; BENBASSOU, A. Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process In: Applied Energy Volume 206, 15 November 2017, Pages 382-392. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.196>. Acesso em: 8 dez. 2020.
- ALFA LAVAL. Aalborg 3-PASS. 2021. Disponível em: <https://www.alfalaval.com.br/produtos/transferencia-de-calor/caldeiras/caldeira-a-vapor-oleo-gas/aalborg-3-pass/>. Acesso em: 6 mai. 2021.
- ALVES FILHOS, J. Matriz energética brasileira: da crise à grande esperança. Rio de Janeiro: Mauad, 2003. ISBN 85-7478-100-2. Acesso em: 13 nov. 2020.
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Gás para o desenvolvimento. Rio de Janeiro: BNDES, 2020. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/publicacoes/livros/gas-para-o-desenvolvimento>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. Análise de Investimentos - Manual Para Solução de Problemas e Tomadas de Decisão. 12.ed. São Paulo: Atlas, 2020. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597023299/>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional: BEN 2020 | Relatório Síntese| ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 8 dez. 2020.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decena-de-expansao-de-energia-2029>. Acesso em: 8 dez. 2020.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Nacional de Energia 2030. Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica%20\(G%C3%A1s%20Natural\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica%20(G%C3%A1s%20Natural).pdf). Acesso em: 30 nov. 2020.
- INDUSTRIAL SOLAR. Fresnel Collector LF-11 Datasheet. 2019. Disponível em: <https://www.industrial-solar.de/>. Acesso em: 23 fev. 2021.
- INDUSTRIAL SOLAR. Fresnel Collector LF-11 Datasheet. 2021. Disponível em: <https://www.industrial-solar.de/>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- LIMA, Maria Thereza da Silva Lopes; SOUZA, Marina Corrêa. Discorrendo Sobre o Uso das Termelétricas no Brasil. Ciência e Natura, vol. 37, núm. 2, 2015, pp. 17-23 Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015. Acesso em: 13 nov. 2020.
- LOURENÇO, E. S. Análise da adição de desemulsificantes em emulsões de óleos combustíveis de usina termelétrica: estudo via propriedades interfaciais. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Tiradentes. Aracaju: UNIT, 2019. Disponível em: <https://openrit.grupotiradentes.com/xmlui/bitstream/handle/set/3384/Everton%20dos%20Santos%20Louren%C3%A7o.pdf?sequence=1>. Acesso em: 13 nov. 2020.
- MARTINS, M. P. Setor de gás natural no Brasil. Seminário internacional: Reestruturação do setor de energia elétrica e gás natural. Rio de Janeiro: 2006. Disponível em: http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/eventos/seminariointernacional/2006/artigos/pdf/Maria_Martins.pdf. Acesso em: 30 nov. 2020.
- MINISTÉRIO DE ECONOMIA (Brasil). Taxas de câmbio, incluindo valor do dólar, para fins fiscais. Anos anteriores. Março/2021. Disponível em: <https://www.gov.br/receita-federal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/declaracoes-e-demonstrativos/ecf/taxas-de-cambio-incluindo-valor-do-dolar-para-fins-fiscais-irpj-AC-antigos>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; MINISTÉRIO DE ECONOMIA (Brasil). Comitê de Promoção da Concorrência no Mercado de Gás Natural do Brasil. Nota Conjunta: Rumo ao novo mercado de gás. Julho/2019. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/notas-tecnicas/2019/nota-tecnica-conjunta-rumo-novo-mercado-gas>. Acesso em: 8 dez. 2020.
- MIRANDA, R. F. C. Análise da Inserção de Geração Distribuída de Energia Solar Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro. Dissertação (mestrado) – UFRJ, COPPE, Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Raul-Miranda-5/publication/304996490_PhotoVoltaic_Solar_Energy_Distributed_Generation_Insertion_Analysis_in_the_Brazili

- an_Residential_Sector_Analise_da_Insercao_de_Geracao_Distribuida_de_Energia_Solar_Fotovoltaica_no_Setor_Residencial_Br/links/577e55e108aed39f5994899e/Photovoltaic-Solar-Energy-Distributed-Generation-Insertion-Analysis-in-the-Brazilian-Residential-Sector-Analise-da-Insercao-de-Geracao-Distribuida-de-Energia-Solar-Fotovoltaica-no-Setor-Residencial-Br.pdf. Acesso em: 11 dez. 2020.
- PBGÁS – COMPANHIA PARAIBANA DE GÁS. Evolução tarifária. 2019. Disponível em: http://www.pbgas.com.br/?page_id=6311 Acesso em: 21 mai. 2021.
- PEREIRA, E.M.D. et al. Energia solar térmica. In. TOMALSQUIM, M. T. (Org). Fontes renováveis de energia no Brasil. p.239-279. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. Acesso em: 8 dez. 2020.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, COSTA, R.S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO G.M. de.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. de; Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2.ed. - São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.:il. (E-BOOK). Acesso em: 8 dez. 2020.
- REIS, L.B.; FADIGAS, E. A. F. A. Energia e sustentabilidade. Barueri, SP: Editora Manole, 2016. 9786555761313. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555761313/>. Acesso em: 8 dez. 2020.
- SANTOS, E. M. et al. Gás natural: estratégias para uma energia nova no Brasil. São Paulo: Annablume, 2002. v.1, p.360. Acesso em: 13 nov. 2020.
- SHARMA, A. K., SHARMA, C., MULLICK, S. C. E KANDPAL, T. C. Solar industrial process heating: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 78, p. 124–137, 2017. b. Acesso em: 13 nov. 2020.
- SILVA, F.P. D.; ALVES, A. Análise de investimento e fontes de financiamento. Porto Alegre: SAGAH, 2018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025394/>. Acesso em: 21 jan. 2021.
- ZAGO, C. A.; WEISE, A. D.; HORNBURG, R. A. A importância do estudo de viabilidade econômica de projetos nas organizações contemporâneas. VI CONVIBRA – Congresso Virtual Brasileiro de Administração. Anais eletrônicos. Convibra, 2009. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54051529/A_IMPORTANCIA_DO_ESTUDO_DE_VIABILIDADE_ECONOMICA_DE_PROJETOS-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1628595850&Signature=OJSkoclMZjHsr7d8cDpFknC6TYTuTRFguAn~gWCTrnnBuI482W0Y6j21cHodHaJF3qpaRTMciAvctm40KZwpDnNNXDOnYkcF4keQb1fo6gpbQscErbdBYYikilMWjx3PyOpFkCbFX0iJiyJBoq8mclYrJYKguhC8IhtoS2Nk4wmZM9dQgVb6PiHtRtX2iEqiHO6aTysrRjNBjvUzb7ImFUDB-25aQ0er4EE7b3Mh-W4P6hF~OQespDRPWqLKzstF-M4SDuC8O3I4xj9~ePH-IsX0c2kwd9AwhIkIStmKACIG3YfaDXRYZBpBakYzYLY7G972XPzpm~mqhW4jAr0gPug__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 11 dez. 2020.

ECONOMIC FEASIBILITY OF ENERGY REPLACEMENT FOR HEATING FUEL OIL IN A THERMAL POWER PLANT IN BRAZIL

Abstract. *The performance of thermoelectric plants in Brazil serves as a national energy security mechanism, complementing and serving periods with lower availability of domestic electricity supply. When fuel oil thermoelectric plants are not in operation, they need to keep the oil warm and for that they use boilers and other alternatives to heat it. Through the case study in a thermoelectric plant in Paraíba, the economic viability of a natural gas boiler and a Fresnel medium temperature solar heating system was comparatively analyzed. The economic viability indicators used were: Net Present Value (NPV), Equivalent Uniform Annual Cost (CAUE) and Levelized Cost of Electricity (LCOE). From the initial investment of R\$ 1,148,679.82 for the boiler and R\$ 10,781,417.00 for the solar collectors. For a planning horizon of 25 years, the natural gas boiler requires annual investment in fuel, operation and maintenance, while the Fresnel solar system only needs the operation and maintenance costs. The solar collector system has a total cost of R\$ 9,433,739.75 and it is evident that the natural gas boiler has increased, obtaining a total cost of R\$ 55,651,069.86. For a TMA of 11.15% p.a., the NPV of the natural gas boiler was -R\$11,744,986.77 and the NPV of the Fresnel system was -R\$19,378,135.03. The CAUE of the natural gas boiler was BRL 2,326,205.26 and the CAUE of the Fresnel system was BRL 1,409,900.90. The most preferable LCOE was that of the Fresnel system of 0.07193 R\$/kWh.*

Key words: *Thermoelectric, Economic engineering, Replacement Analysis of Equipment's.*