

Artigo técnico

Estudo de viabilidade de cogeração a gás natural associada a resfriador de líquido por absorção e sistema fotovoltaico conectado à rede no setor industrial farmacêutico

Feasibility study of natural gas trigeneration associated with absorption chilled water and on grid photovoltaic system in the pharmaceutical industrial sector

Laércio Antônio Piva ^{a*}, Wagner Aldeia ^b

^a Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. São Paulo - SP, Brasil.

^b Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. São Paulo

E-mail: piva@consultoriajundiai.com.br

Palavras-chave:

Trigeração híbrida de energia; Trigeração a gás natural; Sistema fotovoltaico conectado à rede; Resfriador de líquido por absorção; Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental.

Keywords:

Hybrid power generation. Natural gas trigeneration. On grid photovoltaic system. Absorption chilled water system. Technical, economic and environmental feasibility study.

Resumo

Motivado pela demanda energética crescente e riscos de escassez no pós-pandemia, este desenvolvimento avaliou a viabilidade técnica, econômica e ambiental de planta de trigeração a gás natural associada a um sistema fotovoltaico conectado à rede, para produção de eletricidade, água gelada e água quente no setor industrial farmacêutico. O estudo se baseou em um modelo de geração híbrida, denominado cenário básico, e quatro alternativos, sendo três híbridos e uma trigeração a gás natural tradicional. Simuladores de processos e sistemas fotovoltaicos foram utilizados, variando o tempo de operação do motogerador e quantidade de módulos fotovoltaicos, bem como a associação a resfriadores de líquido por absorção do tipo água quente cogerada e queima direta de gás natural. Os resultados em termos de eficiência energética e emissão de dióxido de carbono foram favoráveis para todos os cenários estudados, enquanto os indicadores econômicos perderam atratividade com o aumento do tempo em carga do gerador a gás natural, bem como com a redução da energia gerada em painéis fotovoltaicos. A usina híbrida do cenário básico, mostrou-se técnica e financeiramente viável, composta por motogerador operando 8 horas por dia, sistema fotovoltaico na potência máxima e armazenamento de água quente para

uso sanitário. Resultou em fator de utilização de energia de 72,9%, taxa interna de retorno de 15,8%, além de reduções de 38,3% dos custos operacionais e 47,2% das emissões de dióxido de carbono em relação ao sistema convencional. Enquanto a trigeração tradicional, compatível com consumo elétrico da instalação sem a contribuição do gerador fotovoltaico, mostrou-se economicamente inviável, devido ao consumo e tarifa do gás natural. Os resultados apontam que gerar parte da energia elétrica em painéis fotovoltaicos, compatibilizar o despacho da trigeração com o período de maior demanda de água gelada e horário de ponta estabelecido pela distribuidora de energia elétrica (CPFL, 2020), foram fatores determinantes para a viabilidade técnica, econômica e ambiental da proposta.

Abstract

Motivated by the growing energy demand and risks of shortages in the post-pandemic, this development evaluated the technical, economic and environmental feasibility of a natural gas trigeneration plant associated with a on grid photovoltaic system, for electricity, chilled and hot water generations in the pharmaceutical industrial sector. The study was based on a hybrid generation model, called the basic scenario, and four alternatives, three being hybrids and a traditional natural gas trigeneration. Simulators of cogeneration processes and photovoltaic systems were used, varying the operating time of the generator and the number of photovoltaic modules, as well as the association with hot water and direct fired absorption chillers. The results in terms of energy efficiency and carbon dioxide emission were favorable for all the studied scenarios, while the economic indicators lost attractiveness increasing the generator operating time, as well as with the reduction of energy generated in panels photovoltaics. The hybrid plant in the basic scenario proved to be technically and financially viable, with the generator operating 8 hours a day, a photovoltaic system at full power and hot water storage for sanitary use. It resulted in an energy use factor of 72.9%, an internal rate of return of 15.8%, in addition to reductions of 38.3% in operating costs and 47.2% in carbon dioxide emissions compared to the conventional system. While traditional trigeneration, compatible with the installation's electrical consumption without the contribution of the photovoltaic generator, proved to be economically unfeasible, due to the consumption and tariff of natural gas. The results show that generating part of the electricity in photovoltaic panels, making the dispatch of trigeneration compatible with the period of greatest demand for chilled water and grid electric peak hours, were determining factors for the technical, economic and environmental feasibility of the proposal.

1 Introdução

A demanda global de energia cresceu 2,3% em 2018, sendo este o maior aumento anual desde 2010. China, Estados Unidos e Índia foram responsáveis por 70% do crescimento da demanda total de energia. Apesar do crescimento das energias renováveis ter ultrapassado as taxas de crescimento das outras formas de geração desde 2010, a participação dos combustíveis fósseis na demanda global de energia primária permanece acima de 80%. Em 2019, em um cenário conservador, foi previsto crescimento médio da demanda energética anual de 1 % até 2040, ou seja, abaixo do realizado em 2018, mostrando que a economia global e a demanda por energia seguem caminhos divergentes, devido ao uso menos intensivo de energia para a fabricação de bens, ganhos de eficiência energética e efeitos de saturação, especialmente em termos de uso de veículos (IEA, 2019).

Para o período de 2020 a 2030, espera-se que à medida que o mundo supere os bloqueios da pandemia da Covid-19, o consumo de energia do segmento industrial retorne aos níveis pré-crise até 2022, enquanto o consumo de energia nos transportes e edifícios comerciais devem demorar um pouco mais, permanecendo abaixo dos níveis anteriores até 2023. Por outro lado, o consumo de energia das residências aumentou em 2020, ocasionado pela mudança do local de trabalho dos escritórios para as residências, tendo em vista a não proliferação do vírus. Em 2025, o consumo total de energia deverá permanecer abaixo das trajetórias pré-crise, mas retomará a taxa de crescimento de 1,2% para o restante da década, portanto, consistente com as projeções pré-pandemia (IEA, 2020).

Espera-se que o PIB (Produto Interno Bruto) mundial cresça em média, 3,3% ao ano, e o brasileiro a uma taxa de 2,9%, no período de 2021 a 2031 (EPE, 2021.b). No Brasil, espera-se a expansão do consumo de energia elétrica a uma taxa média de 3,5% ao ano e o gás natural a 3% ao ano, ao longo do decênio de 2021 a 2031 (EPE, 2021.c; EPE, 2021.d).

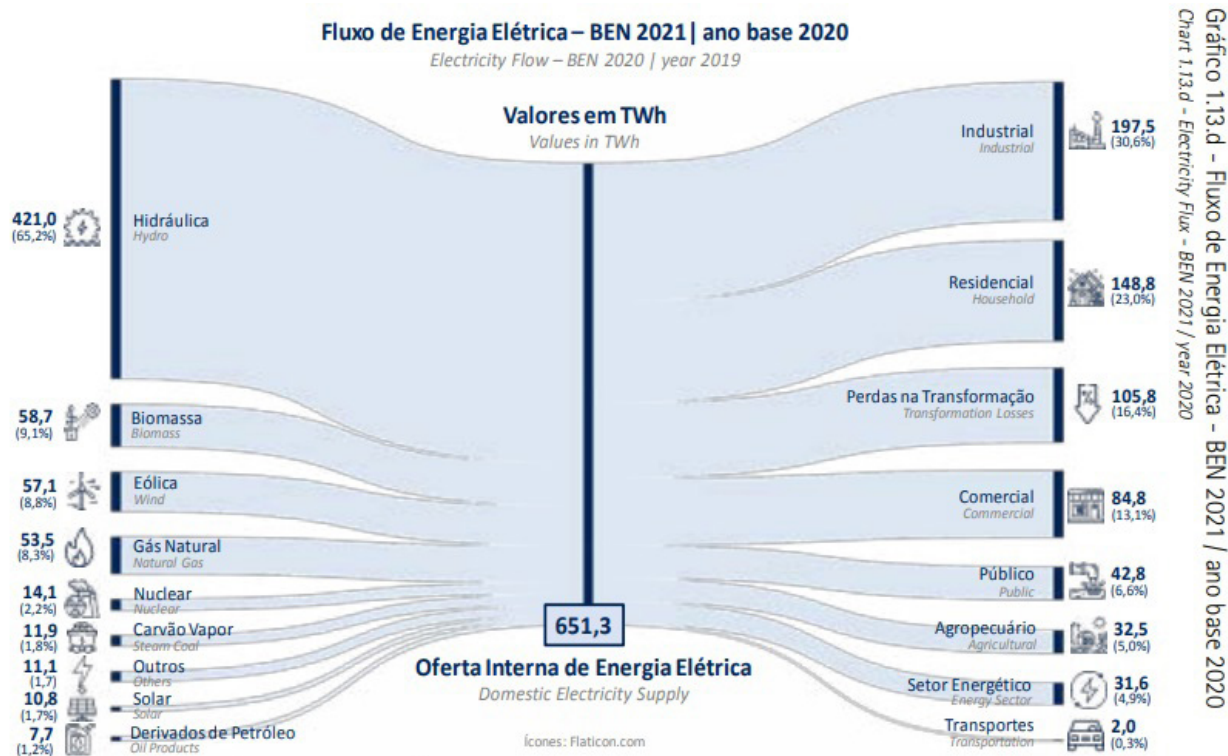
A **Figura 1**, mostra que a geração elétrica brasileira é predominantemente renovável, representando 80,4% da oferta interna de eletricidade, resultante de 65,2% das hidráulicas, 8,2% de biomassa e 6,8% de fontes eólicas e 1,7% de origem fotovoltaica. Apesar dos altos níveis de irradiação solar incidentes no país, a geração fotovoltaica apresenta pequena contribuição na matriz elétrica, o que por si só evidencia o potencial de expansão dessa tecnologia. Do lado do consumo, o segmento industrial representou 30,6% de toda energia elétrica gerada no país em 2020, bem como as perdas existentes na transformação chegam a 16,4% do total gerado (EPE, 2021a).

No Brasil, considerando o cenário de crescimento da demanda elétrica discutido anteriormente, a forte dependência da geração hidráulica, índices pluviométricos irregulares e limitada capacidade de armazenamento das usinas hidrelétricas recentemente construídas, torna-se necessário a entrada em operação das térmicas utilizando combustíveis fósseis para suprir a demanda nacional não atendida. A estratégia utilizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), traz como externalidades a maior emissão de dióxido de carbono e cobrança adicional nas tarifas, as chamadas

bandeiras tarifárias, que têm como objetivo recuperar os elevados custos de operação das térmicas a base de combustíveis fósseis, em comparação com a geração hidráulica. Em agosto de 2021 o Ministério das Minas e Energia, elevou o patamar da bandeira de escassez hídrica vermelha em 49,6 %, passando de R\$ 9,49 para R\$14,20 a cada 100 kWh consumido (MME, 2021).

Nesse contexto de incertezas e tarifas elevadas, o presente artigo se concentra em configurar usina híbrida composta por trigeração a gás natural associada a resfriadores de líquidos por absorção e gerador fotovoltaico, para produção de energia elétrica, água gelada e parte da água quente consumida em indústria farmacêutica em operação no sudeste brasileiro. Cinco alternativas foram configuradas e simuladas, sendo quatro híbridas, compostas por motogerador a gás natural associado a resfriadores por absorção e gerador fotovoltaico conectado à rede, e uma pura, composta apenas por motogerador a gás natural associado a resfriadores por absorção. É objetivo central do artigo comparar as cinco soluções propostas com um sistema convencional dependente da rede de distribuição de eletricidade, em termos de eficiência energética, viabilidade econômica e emissão de dióxido de carbono.

Figura 1 – Fluxo nacional de energia elétrica

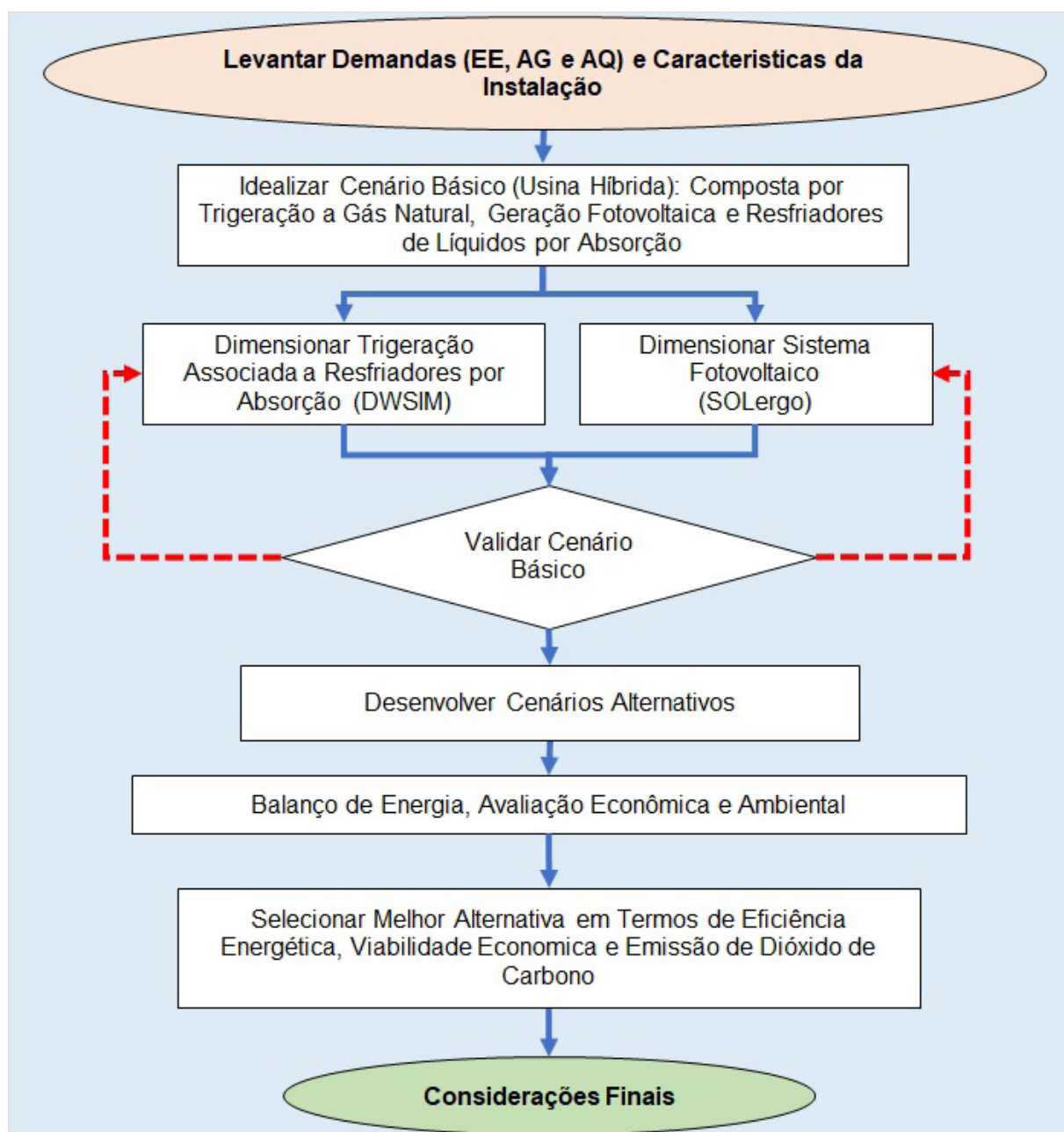


Fonte: EPE (2021a).

2 Geração Híbrida De Energia: Configuração E Simulação

O estudo foi desenvolvido com base nas demandas energéticas da indústria, no entanto, o conceito pode ser replicado para outros setores demandantes de eletricidade, aquecimento e resfriamento.

Figura 2 - Etapas do processo de pesquisa



Fonte: elaborado pelos autores

Como ilustrado no fluxograma da **Figura 2**, o trabalho se iniciou com o levantamento das características e demandas da instalação, seguido da idealização de modelo híbrido baseado nas tecnologias de trigeriação a gás natural e geração fotovoltaica conectada à rede. Em seguida, foi dimensionamento o sistema híbrido com auxílio de simuladores de processos e projeto fotovoltaico. Conclui-se o estudo com a inclusão de cenários alternativos, balanços, análises dos resultados e escolha da solução mais adequada para a instalação, juntamente com as considerações finais que justificam tais caminhos.

Para o dimensionamento da trigeriação a gás natural do presente estudo, foi utilizado o simulador de processos químicos para regime estacionário, DWSIM 7.1.1 (Open Source Process Simulator), identificado como o ambiente que mais se assimilou aos simuladores comerciais, e para o projeto fotovoltaico, foi empregado o software SOLergo, na versão 2022.

Os cenários, atual e propostos para produzir as três formas de energia consumidas na fábrica (eletricidade, água quente e água gelada), apresentam as seguintes composições:

Cenário Convencional (CC): no modelo atual de suprimento energético, a energia elétrica da rede atende as cargas elétricas em geral, bem como movimenta os resfriadores elétricos para produzir a água gelada consumida pelo ar-condicionado central. A água quente para aquecimento de processos é produzida em gerador a gás combustível convencional, enquanto a água quente de baixa temperatura para fins sanitários é gerada em aquecedores elétricos no ponto de uso;

Cenário Básico (CB): composto por motogerador a gás natural previsto para operar a plena carga 8 horas por dia, bem como integrado a um sistema fotovoltaico com potência compatível com a demanda elétrica contratada. A água gelada será produzida em resfriadores por absorção do tipo água quente cogenerada e queima direta de gás natural. O calor recuperado e não utilizado pelo resfriador, será aproveitado para aquecimento de processos e produção de água quente para uso sanitário. Além disso, considera-se manter um pequeno consumo de energia elétrica da concessionária.

Cenários Alternativos (CA-01, CA-02, CA-03 e CA-04): foram desenvolvidos a partir da configuração básica, no entanto, com variação do tempo de operação diária do motogerador (3, 10, 12 e 13 horas respectivamente), além da redução da potência instalada do sistema fotovoltaico para evitar excedentes de eletricidade.

2.1 Demandas energéticas

O estudo se baseou em unidade industrial farmacêutica em funcionamento no sudeste brasileiro com manufatura em ambientes controlados e não controlados. A água gelada utilizada pelos sistemas de ar-condicionado é produzida em resfriadores elétricos do tipo

parafuso com condensação a água. As demandas energéticas (energia elétrica, água gelada e água quente) foram estimadas com base no projeto da planta e regime operacional da central de água gelada (CAG).

Funcionamento da indústria

24 horas por dia, 5 dias por semana e 260 dias por ano;

Energia Elétrica

Potência elétrica contratada: fora de ponta: 1.100 kW / ponta: 1.000 kW;

Consumo elétrico fora de ponta: 3.870 MWh/ano;

Consumo elétrico na ponta: 640 MWh/ano;

Consumo elétrico total: 4.508 MWh/ano;

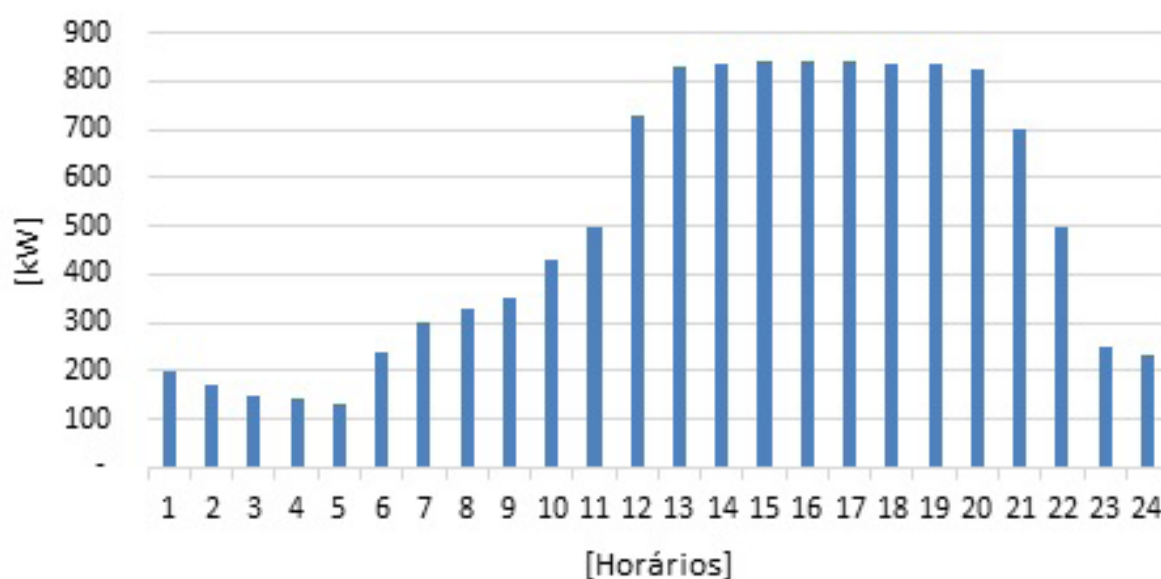
Água Gelada

Capacidade térmica instalada (resfriadores elétricos): 1.030 kW;

Consumo térmica anual: 3.127.800 kWh/ano;

Demanda térmica horária máxima: 950 kWh/h.

Figura 3 – Perfil de Carga Térmica



Fonte: dados da unidade fabril obtidos pelo autor

Água Quente de Processos

Demanda horária máxima: 100 kWh/h;
Consumo térmico (AQ) anual: 624 MWh/ano;
Consumo de gás natural estimado: 78.000 Nm³/ano;
Eficiência do gerador de água quente: 80%;
PCI estimado para gás natural: 8600 kcal/h.

Água Quente de Uso Sanitário (aquecimento elétrico)

Consumo anual de energia elétrica: 98 MWh/ano.

2.2 Modelo proposto: geração híbrida de energia elétrica e térmica

A trigerção híbrida de energia proposta se baseia em duas tecnologias para suprimento da demanda energética da instalação, sendo uma trigerção a gás natural e um sistema fotovoltaico conectado à rede. Conceitualmente, a trigerção é usada para produzir energia elétrica, e simultaneamente fornecer energia térmica para aquecimento e resfriamento, por meio da recuperação da energia térmica contida nos gases da combustão, que de outra forma seria direcionado para a atmosfera (Rocha, M.S et al., 2012). Enquanto a conversão fotovoltaica transforma parte da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica. O efeito fotovoltaico ocorre em certos materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade (ZILLES, R. et al, 2012).

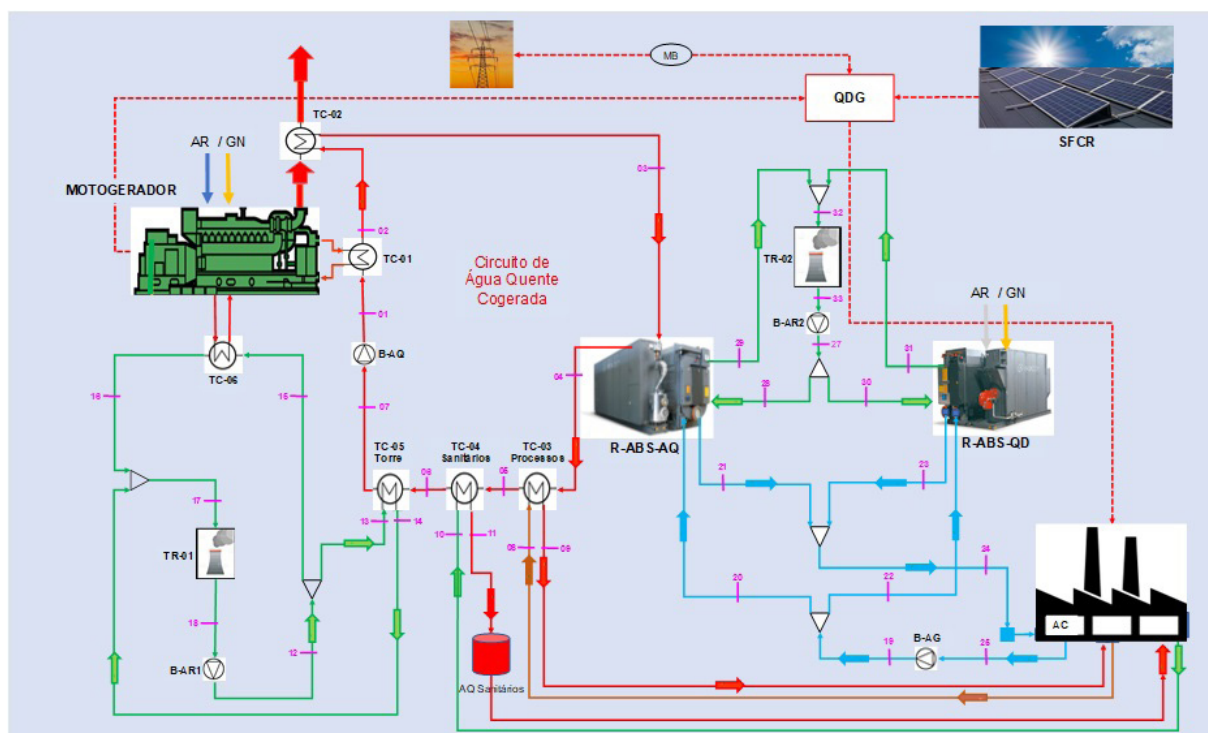
A trigerção híbrida idealizada (**Figura 4**) é composta por um motogerador a gás natural, trocador de calor para resfriamento do bloco, óleo e primeiro estágio do intercooler do gerador (TC-01), recuperador do calor contido nos gases da exaustão (TC-02), resfriador por absorção do tipo água quente cogeração (R-ABS-AQ), trocador de calor para produção de água quente de processos (TC-03), trocador de calor para geração de água quente baixa temperatura para fins sanitários (TC-04), reservatório de armazenamento de água quente para uso humano, trocador de calor destinado a remover o calor em excesso do circuito de água quente cogeração (TC-05) e dissipar na torre de resfriamento (TR-01), além do trocador de calor para resfriamento do segundo estágio do intercooler do motogerador (TC-06).

Inclui no modelo proposto da **Figura 4**, um resfriador por absorção para operar com queima direta de gás natural (R-ABS-QD) para suprir a demanda de água gelada não atendida pela trigerção, além de incrementar confiabilidade e flexibilidade operacional ao sistema.

Ainda na **Figura 4**, uma segunda torre (TR-02) é utilizada para resfriamento do absorvedor e condensador dos resfriadores de líquidos da planta. O modelo proposto considera que a energia elétrica produzida no motogerador e sistema fotovoltaico (SFCR) serão injetadas no quadro elétrico geral da fábrica (QDG), podendo ser utilizada na fábrica ou seguir para a rede da concessionária. E por

fim, o medidor bidirecional (MB) da **Figura 4**, tem a função de contabilizar a energia elétrica entregue e recebida da rede da concessionária. Conforme Zilles et al. (2012), o medidor bidirecional faz o balanço entre a energia que flui da edificação para a rede elétrica e da rede para a edificação, permitindo que a energia excedente produzida localmente seja descontada do total tarifado pela concessionária.

Figura 4 – Modelo Proposto – Trigeração Híbrida de Energia



Fonte: elaborado pelo autor.

2.3 Simulação da trigeração a gás natural

A simulação envolve métodos iterativos em um processo de regime estacionário. Os resultados variam com a quantidade de energia térmica disponibilizada pelo motorgerador (sistema de refrigeração e gases da exaustão), demandas térmicas pré-estabelecidas para o resfriador de líquido e trocadores de calor, bem como as eficiências desses equipamentos. A simulação foi desenvolvida por meio do software aberto DWSIM 7.1.1, seguindo as correntes e interligações estabelecidas no modelo proposto na **Figura 4**.

Motogerador a gás natural selecionado

Tabela 1: Parâmetros do motogerador selecionado

Item	Parâmetro	Motogerador
1	JENBACHER – Gas Reciprocating Engine – 60 Hz	J-320
2	Combustível	Gás Natural
3	RPM (rotações por minuto)	1800
3	Energia do Gás Natural	2.715 kW
3	Potência elétrica	1062 kW
4	Energia térmica total	1360 kW
5	Energia refrigeração (1° est. Inter., óleo e bloco)	661 kW
6	Energia dos gases da exaustão	663 kW
7	Eficiência elétrica	39,4 %
8	Eficiência térmica	50,4 %
9	Eficiência global	89,8 %
10	Cilindros V 70°: diâmetro 135mm x 170 mm de curso	20 cilindros

Fonte: adaptado (GE,2009 e INNIO, 2020)

A Tabela 1 mostra os principais parâmetros do motogerador, levando em conta os requisitos de potência elétrica, consumo de eletricidade da instalação e demanda térmica. Para o cenário básico foi imposto para o motogerador funcionar 8 horas por dia. A validação da potência térmica disponível foi realizada por simulação com auxílio do software de processos DWSIM 7.1.1, como mostra o balanço termodinâmico da Tabela 2.

Resfriadores por absorção selecionados: a Tabela 2, nas linhas de fluxos 20 e 21, indica que o resfriador de absorção do tipo água quente cogeração de 1.100 kW da fabricante Indiana Thermax, atende à condição de demanda máxima de água gelada da instalação. Para produção da demanda de água gelada com a cogeração fora de operação, foi selecionado um resfriador por absorção do tipo queima direta de gás natural da fabricante chinesa BROAD, com a mesma capacidade de resfriamento, de modo a atender a demanda máxima do ar-condicionado, além de agregar flexibilidade e confiabilidade operacional à CAG (central de água gelada).

Resultados da simulação

A simulação foi realizada considerando a condição de demanda térmica máxima, tanto para resfriamento quanto para aquecimento. Também foi premissa para realização do balanço termodinâmico, utilizar apenas o resfriador por absorção tipo água quente, deixando o resfriador tipo queima direta na condição *stand-by*.

A **Tabela 2** mostra na primeira coluna da esquerda para a direita as correntes de fluxo, conforme apresentado no fluxograma da **Figura 4**. A **Tabela 2** indica também os equipamentos, temperatura (T), pressão (P), volume mássico (m), variação de entalpia (Δh) e na última coluna da direita o fluxo térmico total por equipamento (Q).

Os resultados da simulação da tabela 2, a qual se baseou fielmente na **Figura 4**, mostram que uma parte do calor contido no fluido de refrigeração e gases da exaustão é transferida para o circuito de água cogenerada através dos trocadores TC-01 e TC-02 respectivamente, elevando a temperatura da água para 87,68°C. Essa água agora aquecida, fornece calor para o ciclo de absorção do resfriador (R-ABS-AQ), bem como aquece processos (TC-03), gera água quente baixa temperatura para fins sanitário (TC-04), e o excesso de calor é direcionado para o meio ambiente através do trocador de calor (TC-05) e torre de resfriamento (TR-01). O calor contido no sistema de refrigeração do 2º estágio do *intercooler* (TC-06), não fornece calor para circuito de água quente cogenerada, como mostra a **Figura-5**, bem como as linhas de fluxos 15 e 16 do balanço termodinâmico da **Tabela 2**.

Tabela 2: Balanço termodinâmico da trigerção a gás natural

Balanço Termodinâmico da Trigerção a Gás Natural						
Fluxos	Equipamentos	T (°C)	P(bar)	m (kg/s)	Δh [kJ/kg]	Q [kW/h]
01	TC-01:Refrigeração motogerador	80,02	4,50	34,28	18,32	627,9
02		84,06	4,00	34,28		
02	TC-02: Gases da exaustão motogerador	84,06	4,00	34,28	16,45	563,8
03		87,68	3,50	34,28		
03	R-ABS-AQ: Refriador AQ Cogenerada	87,68	3,50	34,28	- 28,27	- 969,0
04		81,48	3,00	34,28		
04	TC-03: AQ processos	81,48	3,00	34,28	- 2,92	- 100,0
05		80,84	2,50	34,28		
05	TC-04: AQ uso sanitário	80,84	2,50	34,28	- 1,37	- 47,1
06		80,55	2,00	34,28		
06	TC-05: Remoção do excesso de calor	80,55	2,00	34,28	- 2,63	- 90,1
07		79,98	1,50	34,28		
07	B-AQ: Bomba AQ	79,98	1,50	34,28	0,42	14,4
01		80,01	4,50	34,28		
08	Fluxo de AQ para processos	60,00	4,00	1,39	72,00	100,0
09		79,65	3,50	1,39		
10	Fluxo de AQ uso sanitário	25,00	2,00	0,37	127,50	47,1
11		62,00	1,50	0,37		
12	Distribuidor: Água resfriamento	29,50	3,0	7,22	0,00	0,0
13		29,50	3,0	2,57		
15		29,50	3,0	4,65		
13	TC-05: Água de resfriamento torre 1	29,50	3,0	4,65	19,35	90,0
14		33,81	2,5	4,65		

Balanço Termodinâmico da Trigeração a Gás Natural						
Fluxos	Equipamentos	T (°C)	P(bar)	m (kg/s)	Δh [kJ/kg]	Q [kW/h]
15	TC-06: Resfriamento intercooler	29,50	3,0	2,57	18,49	47,5
16		33,61	2,5	2,57		
14	Misturador: Misturador água para TR-01	33,81	2,5	4,65	0,00	0,0
16		33,61	2,5	2,57		
17		33,74	2,5	7,22		
17	TR-01: Torre de resfriamento 01	33,74	2,5	7,22	-19,34	-139,7
18		29,49	0,5	7,22		
18	B-AR1: Bomba TR-01	29,49	0,5	7,22	0,30	2,2
12		29,50	3,0	7,22		
19	Distribuidor: AG para resfriador	11,03	4,00	41,67	0,00	0,0
20		11,03	4,00	41,67		
22		11,03	4,00	0,00		
20	R-ABS-AQ: Resfriador por absorção AQ	11,03	4,00	53,05	-18,26	-968,7
21		7,00	3,50	53,05		
22	R-ABS-QD: Resfriador absorção QD	<i>Condição Stand-by</i>				
23						
21	Misturador: AG para fábrica	7,00	4,00	53,05	0,00	0,0
23		0,00	0,00	0,00		
24		7,00	3,50	53,05		
24	AC: Ar condicionado da fábrica	7,00	3,50	53,05	17,91	950,1
25		11,02	1,00	53,05		
25	B-AG: Bomba de AG	11,02	1,00	53,05	0,35	18,6
19		11,03	4,00	53,05		
27	Distribuidor: Água de resfriamento (AR)	29,50	3,50	87,35	0,00	0,0
28		29,50	3,50	87,35		
30		0,00	0,00	0,00		
28	R-ABS-AQ: Resfriador absorção AQ	29,50	3,50	87,35	21,97	1919,0
29		34,40	2,50	87,35		
30	R-ABS-QD: Resfriador absorção QD	<i>Condição Stand-by</i>				
31						
29	Misturador: AR vai para TR-02	34,40	2,50	87,35	0,00	0,0
31		0,00	0,00	0,00		
32		34,40	2,50	87,35		
32	TR-02: Torre de resfriamento 02	34,40	2,50	87,35	-22,33	-1950,5
33		29,48	0,50	87,35		
33	B-AR2: Bomba AR 2	29,48	0,50	87,35	0,36	31,4
27		29,50	3,50	87,35		

Fonte: elaborado pelo autor (Com auxílio do DWSIM – Versão 7.1.1)

Ainda sobre os resultados da simulação demonstrados na **Tabela 2**, verifica-se a água gelada retornando do ar-condicionado a temperatura de 11,06°C pelo fluxo 25 e sendo bombeada em direção ao resfriador por meio das correntes 19 e 20, onde ocorre a redução da temperatura para 7°C, e agora como água resfriada segue para as serpentinas do ar-condicionado pelas correntes de fluxo 21 e 24, onde ganha temperatura e fecha o ciclo.

A **Tabela 2** mostra também que a água resfriamento na temperatura de 27,5°C sai da bacia da torre através da corrente de fluxo 33, é bombeada e segue pelas correntes 27 e 28 até o resfriador, onde remove parte do calor do absorvedor e condensador e retorna para a torre por meio do fluxo 29, para resfriar e iniciar novo ciclo.

Concluindo a descrição do processo de simulação, a **Tabela 2** mostra o resfriador de absorção tipo queima direta na condição stand-by (fora de operação), sendo possível observar a inexistência de fluxos de água gelada nas correntes 22 (entra) e 23 (sai), bem como nas correntes da água de resfriamento 30 (entra) e 31 (sai), indicando que as válvulas de controle de fluxo dessas correntes de massa foram fechadas pelo sistema de automação da planta de energia.

Tabela 3: Balanço de Energia – Trigeração

Balanço de Energia – Trigeração		
Parâmetros	kWh/h	% [Item / total]
Energia do gás natural que entra no motogerador	2,715.0	100.0%
Energia elétrica gerada	1,062.0	39.1%
Energia térmica da AG 7°C produzida	950.0	35.0%
Energia térmica - AQ procesos	100.0	3.7%
Energia térmica - AQ sanitária	47.1	1.7%
FUE (fator de utilização de energia) = $(W+Q_u) / Q_c$	-	79.5%

Fonte: elaborada pelo autor

A **Tabela 3** resume o balanço de energia e rendimento energético da planta de trigeração, destinada a produção combinada de energia elétrica, água gelada e água quente, na condição de demanda térmica máxima da instalação.

2.4 Dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede

O gerador fotovoltaico indicado na **Figura 4**, foi dimensionado considerando que a somatória das potências dos inversores deverá estar limitada a nova demanda contratada (935 kW). A produção de energia do sistema fotovoltaico foi estimada com auxílio do Software SOLergo 2022, levando em conta os fatores referentes a irradiação solar e temperatura da localidade, orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos, efeitos de sombra próxima e distante do plano gerador, eficiência dos inversores, riscos de sujidades das células fotovoltaicas e perda de eficiência dos módulos, bem como perdas em conexões e cabearmentos elétricos.

Foi observado também os requisitos das resoluções normativas, as quais estabelecem os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 3, da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), juntamente com os procedimentos e condicionantes da concessionária local para acesso à rede, considerando a classe e nível de tensão da conexão da instalação.

Tabela 4: Parâmetros do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede – Cenário Básico

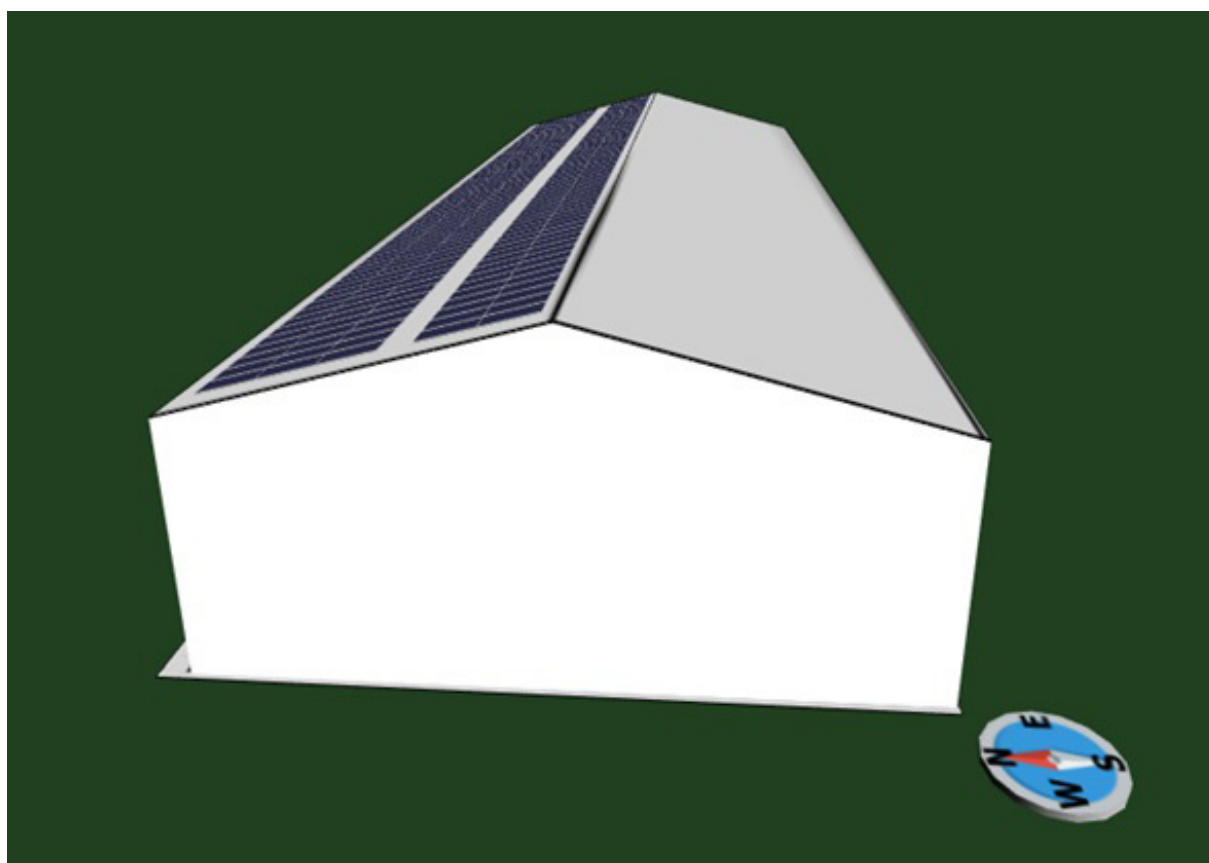
Parâmetros do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede – Cenário Básico	
Potência de pico instalada;	1.040 kW
Potência simulada para os inversores:	880 kW
Irradiação solar no plano inclinado (CRESESB, 2020)	4,6 kWh/m ² . dia
GE(SFCR) Produção de energia elétrica	1.437 MWh / ano
Oito (8) subsistemas 325 módulos	2.600 módulos
Potência de pico cada módulo fotovoltaico monocristalino	400 W
Área de exposição por painel fotovoltaico	1,978 x 0,999 = 1,98m ²
Área de exposição total dos painéis fotovoltaicos	2600 x 1,98 = 5.148 m ²
Área de telhado requerida:	6.720 m ²
Quantidade de inversores 100 kW, 380 Vac, 60 HZ	8 inversores
Desempenho geral do gerador	0,82
Fator de dimensionamento do inversor	0,77

Fonte: elaborada pelo autor

A **Tabela 4** mostra os principais parâmetros e resultados do sistema fotovoltaico dimensionado com auxílio do SOLergo 2022, tais como, a potência de pico, potência calculada dos inversores, irradiação no plano inclinado, quantidade e potência dos módulos fotovoltaicos, fator de dimensionamento do inversor (FDI), área de telhado, bem como a energia produzida e eficiência do sistema.

Dentre os fatores que afetam o custo-benefício do projeto fotovoltaico, aparece o fator de dimensionamento do inversor. O FDI é uma razão entre a potência nominal do inversor e a potência de pico do gerador, e de forma geral, os valores de FDI recomendados por fabricantes situam-se na faixa de 0,75 a 0,85. (CRESESB, 2014).

Figura 5: Layout Gerador Fotovoltaico Conectado à Rede



Fonte: elaborada pelo autor (Com auxílio do SOLergo, 2022)

A **Figura 5** ilustra um subsistema com 325 módulos de 400 W (monocristalino) arranjados em prédio com cobertura metálica, e um inversor de 100 kW, sendo que o gerador do estudo é composto por oito subsistemas similares, totalizando 2600 módulos e 8 inversores, como informado na **Tabela 4**. O espaço livre entre a terceira e quarta fileiras de módulos mostrada na **Figura 5**, visa facilitar o acesso para limpeza, inspeção e manutenção dos módulos e conexões do circuito de corrente contínua.

3 Discussão dos Resultados

As análises e discussões se baseiam em resultados dos estudos básico e alternativos, com o propósito de selecionar a melhor configuração para geração de energia elétrica e térmica em indústria do setor farmacêutico do sudeste brasileiro. As análises dos cenários se darão em termos de eficiência energética, viabilidade econômica e emissão de dióxido de carbono, tendo como referência um cenário convencional (CC), o qual tem forte dependência da rede da concessionária.

3.1 Eficiência Energética:

Conteúdo da **Tabela 5**, por energético:

EE (Energia Elétrica): Nova demanda contratada exclui a carga dos resfriadores elétricos e inclui as cargas das novas instalações. O balanço anual reflete o novo consumo, bem como a produção do motogerador e sistema fotovoltaico. A pequena quantidade de energia importada da rede fecha o balanço anual.

GN (Gás Natural): O total consumido na usina é resultante do gás natural utilizado no motogerador operando a plena carga, queima direta em resfriador de absorção e produção de água quente a partir de vapor da caldeira.

AG (Água Gelada): Com o motogerador operando, a totalidade da água gelada demandada pelo sistema de ar-condicionado será produzida em resfriador tipo água quente cogenerada. O Resfriador tipo queima direta atende as demandas adicionais.

AQ (Água Quente) de processos: Com o motogerador em funcionamento, o calor para aquecimento de processo será produzido a partir da água quente cogenerada.

AQ (Água Quente) uso sanitário: A totalidade da água quente para fins sanitários será produzida a partir de rejeitos térmicos, reduzindo o consumo de energia elétrica.

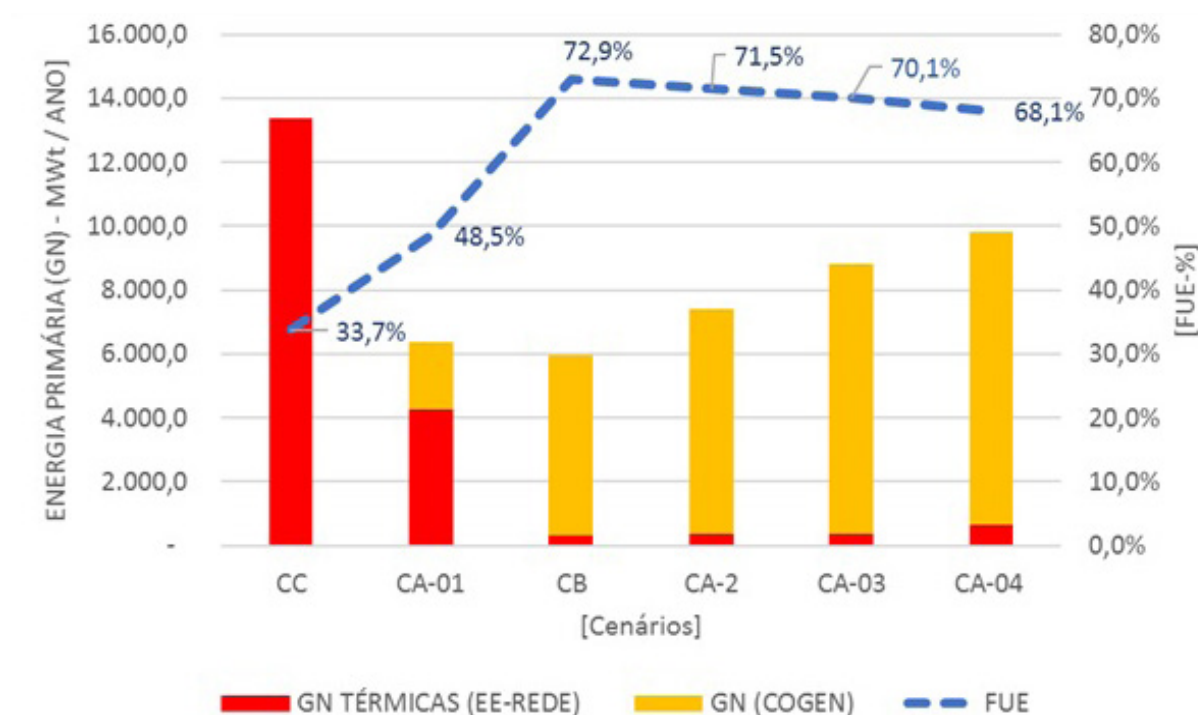
FUE (Fator de Utilização de Energia) global: É um balanço da geração local e energia importada da rede para cada cenário.

Tabela 5: Balanço energético geral

BALANÇO GERAL DE ENERGIA : TODOS OS CENÁRIOS								
Item	Parâmetros	Unidades	CC	CA-01	CB	CA-2	CA-03	CA-04
1	Horas/Dia de Motogerador a Plena Carga	[Horas/Dia]	0,0	3,0	8,0	10,0	12,0	13,0
2	Demanda Elétrica Contratada							
2.1	Horário de ponta: tarifa azul	[kW]	1.000,0	-	-	-	-	-
2.2	Horário fora de ponta: tarifa azul		1.100,0	-	-	-	-	-
2.3	Nova demanda elétrica calculada: tarifa única verde		-	935,0	935,0	935,0	935,0	935,0
3	Consumo energia elétrica concessionária	[MWh/ano]	4.508,4	1.440,2	109,0	113,4	117,9	214,6
4	Geração de energia elétrica (EE)		-	2.263,0	3.639,7	3.653,4	3.667,1	3.579,4
4.1	Motogerador a gás natural (We)	[MWh/ano]	-	826,0	2.202,7	2.753,4	3.304,1	3.579,4
4.2	Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR)		-	1.437,0	1.437,0	900,0	363,0	-
5	Consumo de gás natural (GN)	[Nm³/ano]	78.000,0	455.411,7	715.452,5	826.602,8	941.519,1	1.001.493,3
5.1	Motogerador		-	211.800,0	564.800,0	706.000,0	847.200,0	917.800,0
5.2	Resfriador ABS QD		-	175.361,7	98.652,5	75.602,8	55.319,1	47.943,3
5.3	Caldeira Convencional		78.000,0	68.250,0	52.000,0	45.000,0	39.000,0	35.750,0
6	Produção água gelada (AG)	[MWh/ano]	3.127,8	3.127,8	3.127,8	3.127,8	3.127,8	3.127,8
6.1	Resfriadores Elétricos		3.127,8	-	-	-	-	-
6.2	Resfriador ABS AQ		-	655,2	1.736,8	2.061,8	2.347,8	2.451,8
6.3	Resfriador ABS QD		-	2.472,6	1.391,0	1.066,0	780,0	676,0
7	Produção água quente de processos (AQ-P)	[MWh/ano]	624,0	624,0	624,0	624,0	624,0	624,0
7.1	Caldeira Convencional: vapor de planta		624,0	546,0	416,0	364,0	312,0	286,0
7.2	Trocador de Calor: AQ cogeração		-	78,0	208,0	260,0	312,0	338,0
8	Produção água quente para uso sanitário (AQ-S)	[MWh/ano]	98,2	98,2	98,2	98,2	98,2	98,2
8.1	Chuveiros e torneiras elétricas		98,2	-	-	-	-	-
8.2	Trocador de Calor: AQ cogeração		-	98,2	98,2	98,2	98,2	98,2
Memória de Cálculo: Eficiência Energética Global								
9	FUE da energia elétrica da rede	[%]	33,7%	33,7%	33,7%	33,7%	33,7%	33,7%
10	FUE da COGEN = (We+Qu) / (Energia GN)		-	78,3%	75,2%	73,3%	71,6%	70,5%
11	Energia primária consumida	MWh/ano	13.370,1	6.388,9	5.971,1	7.396,3	8.821,7	9.814,4
11.1	GN consumido na térmica: energia elétrica da rede		13.370,1	4.270,9	323,1	336,3	349,7	636,4
11.2	GN consumido na TRIGERACÃO: energia el. e térmica gerada		-	2.118,0	5.648,0	7.060,0	8.472,0	9.178,0
12	FUE Global = (Rede + Trigeracão)	[%]	33,7%	48,5%	72,9%	71,5%	70,1%	68,1%

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 6: utilização de energia primária (GN)



Fonte: elaborada pelo autor (Com auxílio do SOLergo, 2022)

A **Figura 6**, relaciona o FUE (fator de utilização de energia) dos cenários com o gás natural consumido nas térmicas centralizadas e na planta de trigeriação do estudo. Para o cálculo do FUE das térmicas foi adotado eficiência de 40% e perdas na geração de 16,4% (EPE, 2021a). A configuração do cenário básico (CB) indica o maior FUE aparente, reflexo do baixo consumo de energia da rede e geração em painéis fotovoltaicos de 38,3% do total da energia consumida. A água gelada corresponde mais de 80% da demanda térmica total da fábrica, portanto, foi fundamental compatibilizar o despacho da trigeriação associada a resfriador de água utilizando rejeitos térmicos, com o período de maior demanda de água gelada para maximização da eficiência energética do sistema.

Com a energia gerada em painéis fotovoltaicos, foi possível reduzir o tempo de operação do motor-gerador sem incrementar o consumo de energia da rede. A equação do fator de utilização de energia mostra que a variação no percentual de utilização da energia térmica disponível reflete diretamente na eficiência da planta, portanto, reduzir a demanda de energia térmica, reduzirá o FUE da proposta.

3.2 Balanço Econômico Geral

Tabela 6: Balanço Econômico Geral

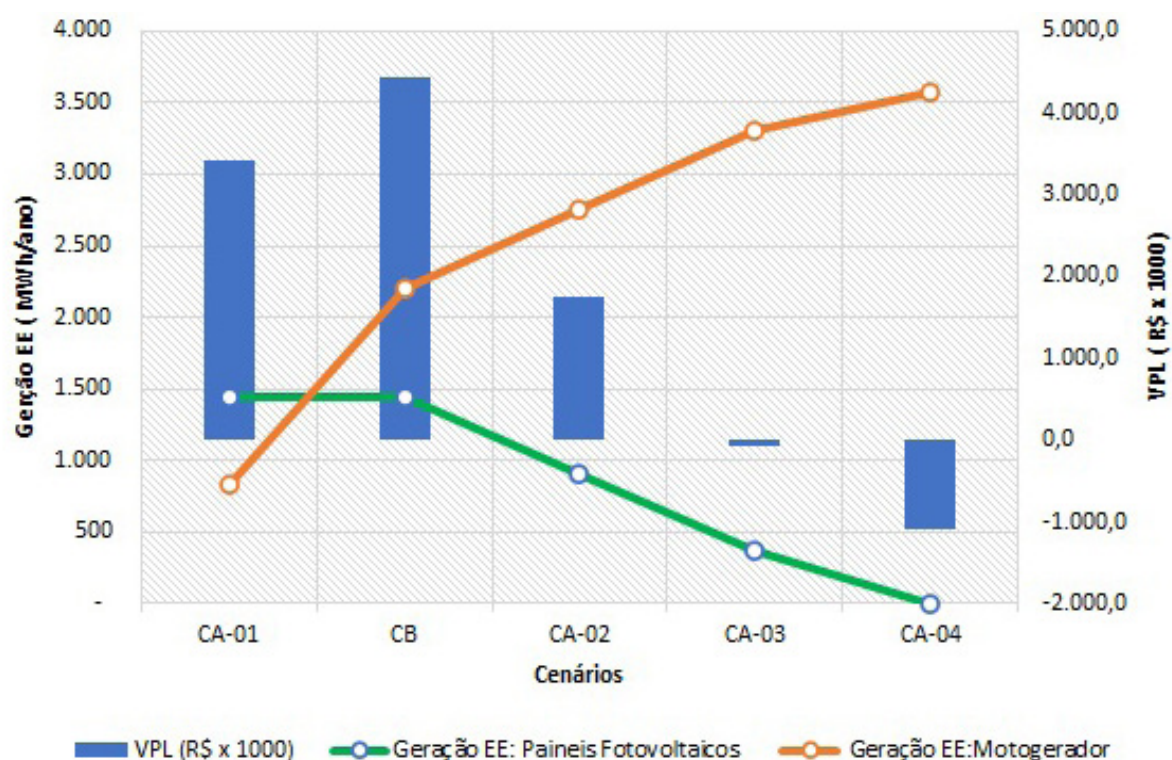
BALANÇO ECÔNOMICO GERAL								
Item	Parâmetros	Unidades	CC	CA-01	CB	CA-02	CA-03	CA-04
1	Tempo op. motogerador a plena carga	[Horas/dia]	-	3	8	10	12	13
1.1	Geração anual eletricidade motogerador	[MWh/ano]	-	826,0	2.202,7	2.753,4	3.304,1	3.579,4
2	Consumo total energia elétrica	[MWh/ano]	4.508,4	3.703,2	3.748,7	3.766,8	3.785,0	3.794,0
3	Potência do sistema fotovoltaico (SFCR)	[kWp]	-	1.040,0	1.040,0	650,0	260,0	-
3.1	Geração anual energia elétrica - SFCR	[MWh/ano]	-	1.437,0	1.437,0	900,0	363,0	-
4	Investimento inicial - projeto e instalação	[R\$×1000]	-	9.911,3	9.911,3	8.334,6	7.149,4	6.349,0
5	Manutenção e água de resfriamento	[R\$×1000]	103,7	197,2	266,7	288,3	309,9	324,5
6	Consumo de energia elétrica da rede	[MWh/ano]	4.508,4	1.440,2	109,0	113,4	117,9	214,6
7	Tarifa média da energia elétrica da rede	[R\$/kWh]	0,60	0,55	1,31	2,33	2,33	2,33
8	Consumo total de gás natural	[Nm³/ano]	78.000	455.412	715.452	826.603	941.519	1.001.493
9	Tarifa média do gás natural	[R\$/Nm³]	2,84	2,13	2,05	2,04	2,02	1,99
10	Taxa de desconto utilizada	[%] ao ano	10%	10%	10%	10%	10%	10%
11	Inflação estimada para o período	[%] ao ano	4,50%	4,50%	4,50%	4,50%	4,50%	4,50%
12	Período de análise	[Anos]	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Resultados Econômicos								
13	TIR (taxa interna de retorno)	[%]	-	14,6%	15,8%	12,7%	9,9%	7,5%
14	VPL (valor presente líquido)	[R\$×1000]	-	3.424,6	4.428,6	1.748,0	-79,7	-1.099,7
15	PBS (payback simples)	[Anos]	-	7,0	6,6	8,6	8,8	9,9

Fonte: elaborada pelo autor

O estudo foi baseado em cinco alternativas, sendo quatro híbridas (CA-01, CB, CA-02 e CA-03) e uma trigerção pura (CA-04). As híbridas, integram uma trigerção a gás natural e um sistema fotovoltaico, enquanto a pura, apenas a trigerção a gás.

A Tabela 6, mostra a utilização de capital próprio, custos com manutenção e tratamento de água, consumo e tarifa média de energia elétrica conforme simulação na página da distribuidora CPFL (2020), consumo e tarifa do gás natural conforme deliberação ARSESP (2020) e índices financeiros adotados, além dos resultados econômicos dos cenários. Os cálculos e análises de viabilidade dos cenários se basearam nos conceitos de Parente, 2017.

Figura 7: VPL x Geração Fotovoltaica X Geração em Motogerador



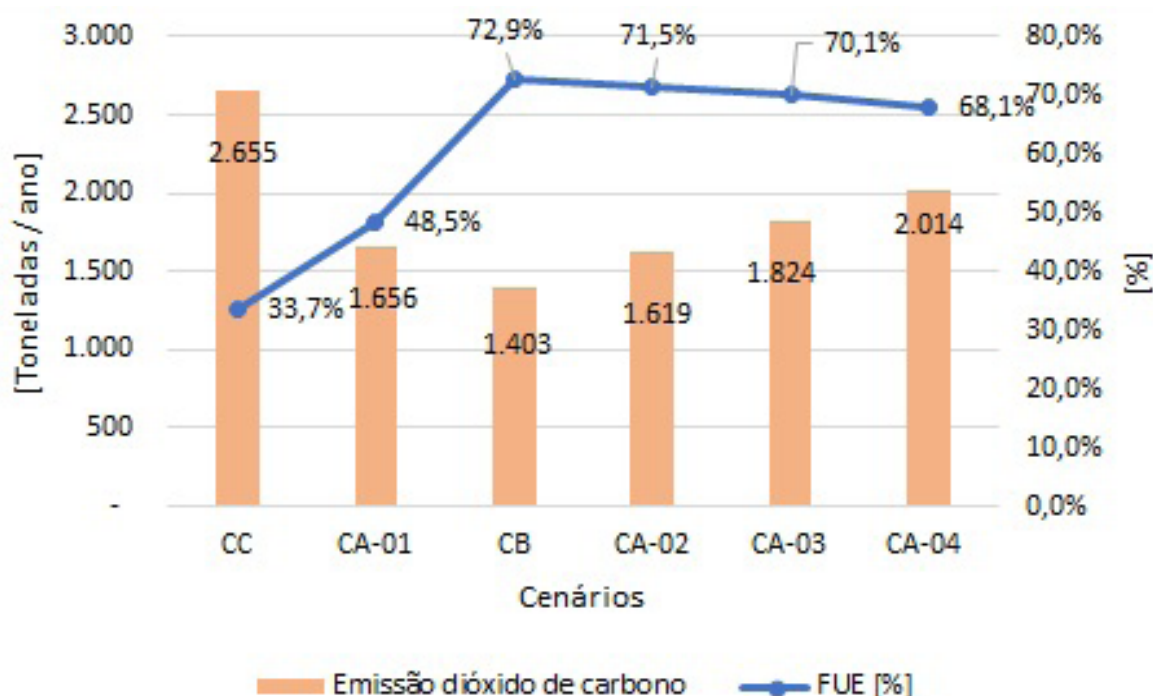
Fonte: Elaborada pelo autor

Para as condições do estudo, produzir energia elétrica, água gelada e água quente em usina híbrida apresentam índices econômicos aceitáveis quando comparado com a utilização da energia da rede. A Figura 7, mostra que o CB (cenário básico) apresenta o melhor VPL aparente, com o motogerador operando 8 horas e o sistema fotovoltaico na potência máxima, bem como evidencia que aumentar a geração de energia elétrica no motogerador a gás natural e reduzir em painéis fotovoltaicos, tende a menores valores de VPL.

3.3 Emissão de Dióxido de Carbono

A análise compara a emissão de dióxido de carbono dos cenários e relaciona com os resultados do FUE (fator de utilização de energia). Para efeito de cálculo, foi considerado que a energia importada da rede de distribuição é gerada em usinas termelétricas, as quais são despachadas para suprir a demanda não atendida pelas hidráulicas, eólicas, solares, biomassa, dentre outras. Sendo assumido que toda energia elétrica produzida localmente reduzirá o despacho das térmicas na mesma proporção.

Figura 8: Emissão de Dióxido de Carbono



Fonte: elaborada pelo autor

Os resultados da **Figura 8** indicam redução de 47,2 % na emissão de dióxido de carbono do cenário básico (CB) em comparação o atual (CC). A melhor condição aparente no CB, tanto em termos de emissão de dióxido de carbono quanto de FUE, ocorrem com baixo consumo de eletricidade da rede, com o motogerador operando 8 horas por dia e geração fotovoltaica na potência instalada máxima. Os cálculos mostram também a trigeração pura (CA-04) emitindo 43,5 % mais dióxido de carbono em comparação com o CB, em uma condição de baixo consumo de energia da rede, motogerador operando 13 horas por dia e sem geração fotovoltaica.

4 Conclusões

Com base nos resultados e análises, é possível concluir que:

- i. Os resultados de eficiência energética e emissão de dióxido de carbono se mostraram viáveis para todos os cenários estudados. No entanto, a viabilidade econômica indicou perda de atratividade com o aumento do consumo de gás natural, revelando forte influência do custo com gás natural;

- ii. O modelo híbrido do cenário básico, se mostrou viável técnica e financeiramente, configurado com o motogerador a gás natural operando 8 horas por dia a plena carga e sistema fotovoltaico conectado à rede na potência compatível com a demanda contratada. Os resultados mostraram FUE (fator de utilização de energia) de 72,9%, VPL (valor presente líquido) de R\$ 4.428.600,00, TIR (taxa interna de retorno) de 15,8 %, PBS (payback simples) de 6,6 anos, além da redução de 38,3 % do custo operacional e 47,2 % na emissão de dióxido de carbono;
- iii. Como demonstrado no balanço energético, o FUE de 72,9% da planta híbrida do cenário básico reflete o pequeno consumo de eletricidade da rede devido a contribuição dos painéis fotovoltaicos, bem como a elevada utilização de água quente cogenerada em resfriador de absorção para atender a demanda de água gelada do HVAC (do inglês, heating ventilating and air conditioning).
- iv. Através da interpolação dos resultados apresentados no balanço econômico geral, observa-se que o VPL (valor presente líquido) se torna negativo com a geração de energia elétrica em painéis fotovoltaicos abaixo de 11,6 % do consumo total da fábrica;
- v. Armazenar o calor excedente na forma de água quente de baixa temperatura para fins sanitários, resultou em ganhos de eficiência da ordem de 1,7% e redução do consumo de energia elétrica atual em mais de 2%;
- vi. A redução do tempo em carga do motogerador, mesmo sendo necessário consumir gás para produzir energia térmica em resfriador por absorção e caldeira, foi fator fundamental para a viabilidade econômica da solução proposta.
- vii. Prever na planta resfriador por absorção do tipo queima direta para produção de água gelada e caldeira para geração de calor, em condições de partida rápida pode incrementar a confiabilidade e flexibilização do sistema;
- viii. A utilização de fonte solar reduz substancialmente a emissão de dióxido de carbono da usina híbrida, por outro lado, a geração firme de energia do motogerador a gás natural resolve o problema de imprevisibilidade típica das renováveis;
- ix. Por fim, integrar as tecnologias de trigeração a gás natural com um sistema fotovoltaico conectado à rede, indicou ser uma alternativa promissora. A implantação da proposta conforme cenário básico poderá reduzir em 97,1% o consumo de energia da rede, sendo 58,8% produzido em motogerador a gás e 38,3 % em painéis fotovoltaicos. Além do aproveitamento dos rejeitos térmicos do sistema de resfriamento e exaustão do motogerador, o qual reduzirá em 16,3% o consumo de eletricidade, por meio da substituição dos resfriadores elétricos por absorção, juntamente com a redução de mais de 30% do consumo de gás natural na caldeira para produção de água quente e redução de 100% da energia elétrica utilizada para aquecimento de água para uso sanitário.

5 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 3**. Brasília: ANEEL, 2017. 74 p. Disponível em: <PRODIST - Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição – ANEEL>. Acesso em: 02 de março de 2020.

AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DELIBERAÇÃO ARSESP Nº 995, de 27 de maio de 2020**. São Paulo: ARSESP, 2020. 18 p. <ldl9952020.pdf (arsesp.sp.gov.br)>. Acesso em: 15 de outubro de 2020.

BROAD. **Absorption Chiller**. New Jersey. USA. BROAD, 2020. <ABSORPTION CHILLER – BROAD U.S.A. INC. (broadusa.com)> Acesso em: 10 de fevereiro de 2020.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO DE SALVO BRITO. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos (2014)**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. Disponível em: <CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (cepel.br)>. Acesso em: 20 de janeiro de 2020.

CENTRO DE REFERÊNCIA DE ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO DE SALVO BRITO. **Potencial Energético Nacional**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2020. <CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (cepel.br)>. Acesso em: 10 de outubro de 2020

COMPANHIA PIRATININGA DE FORÇA E LUZ. **Distribuidora de Energia Elétrica do Estado de São Paulo**. Campinas: CPFL, 2020. <<https://www.cpfl.com.br/>>. Acesso em: 25 fev.2020.

DWSIM. **The Open-Source Chemical Process Simulator – Version 7.1.1**. DWSIM, 2021. <DWSIM - Open Source Process Simulator - Browse /DWSIM/DWSIM 7.1/7.1.2 at SourceForge.net>. Acesso em: 30 de janeiro de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 219: Ano base 218**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <BEN 2019 Completo.indb (epe.gov.br)>. Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021a. Disponível em: < BEN2021.pdf (epe.gov.br) > Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica – Cenário econômico próximos 10 anos**. Rio de Janeiro: EPE, 2021b. Disponível em: <Cenários econômicos para os próximos 10 anos (epe.gov.br)>. Acesso em: 10 de janeiro de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos do plano decenal de expansão de energia 2031 – Demanda de eletricidade**. Rio de Janeiro: EPE, 2021c. Disponível em: <Apresentação do PowerPoint (epe.gov.br)>. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos do plano decenal de expansão de energia 2031 – Previsão da produção de petróleo e gás natural.** Rio de Janeiro: EPE, 2021d. Disponível em: <Apresentação do PowerPoint (epe.gov.br)>. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

GENERAL ELECTRIC COMPANY. **Energy – Cogeneration Application Considerations.** GE, 2009. 48p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2019.** IEA, 2019. Disponível em: <WORLD ENERGY OUTLOOK 2019 (windows.net)> Acesso em: 05 de março de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2020 – The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions.** IEA, 2020. Disponível em <Global Energy Review 2020 (windows.net)>. Acesso em: 14 de janeiro de 2022.

INNIO. **Jenbacher gas engine type 3 technical data.** Disponível em: <Sales and Services Provider | Company - INNIO>. Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Novo patamar para a bandeira tarifária de escassez hídrica.** Brasília. MME, 2021. <MME e Aneel apresentam medidas para enfrentamento do cenário de aumento nos custos de geração de energia – Português (Brasil) (www.gov.br)>. Acesso em: 10 dezembro de 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano de Operação Energética 2021/2025.** Rio de Janeiro: ONS, 2021. <<http://www.ons.org.br>> Acesso em: 20 de janeiro de 2022.

PARENTE, V. **Análise de Viabilidade Econômica de Projetos de Energia.** In: SIMÕES-MOREIRA, J.R. (org.). *Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.* São Paulo: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2017. p. 336 – 348.

ROCHA, M.S.; Andreos, R.; SIMÕES-MOREIRA, J.R. **Performance tests of two small trigeneration pilot plants.** São Paulo: Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2012. 8 p.

SOLergo. **Projeto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou isolados.** San Martino di Lupari. SOLergo, 2022. <Solergo - Progettazione impianti fotovoltaici in rete o in isola (electrographics.it)>. Acesso em: 20 de dezembro de 2021.

THERMAX. **Hot Water Vapour Absorption Chiller.** Mumbai. 2020. Thermax, 2020. <<https://www.thermaxglobal.com/>> Acesso em: 24 de fevereiro de 2020.

ZILLES, R. **et al.** *Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.* São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2012. 208 p.

10.34033/2526-5830-v6n19-3

