

## **GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO TÉRMICA - GGT**

### **DIMENSIONAMENTO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA USINA TERMOELÉTRICA A GÁS NATURAL UTILIZANDO BANCO DE BATERIAS**

**MARCOS ALEXANDRE IZIDORO DA FONSECA(1); RODRIGO FLORA CALILI(1); SERGIO LEAL BRAGA(1)**  
**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO(1)**

#### **RESUMO**

As ações antrópicas em nível global ao longo do tempo, nos trouxe ao estado atual de urgências climáticas e ambientais. O objetivo deste trabalho é propor um modelo de simulação numérica para usinas termoeletricas híbridas em conjunto com sistemas de armazenamento de energia. Os sistemas propostos tem como linha de base os geradores a Diesel que são largamente empregados de forma distribuída em indústrias e comércios. Nos resultados, entre a linha de base e o melhor cenário estudado, a média de redução no consumo específico foi de 11,23% e a média do aumento da eficiência foi de 13,16%.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Simulação, Geradores Diesel, Gás Natural, Baterias, Eficiência energética.

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

As atividades antrópicas, necessariamente, se desenvolvidas de forma irracional e não ponderada afetam diretamente a qualidade de vida dos diversos seres vivos que fazem parte de um determinado ecossistema. Dado o estágio avançado da interferência humana sobre a biosfera, torna-se preponderante a criação de formas alternativas de desenvolvimento, que sejam necessariamente mais sustentáveis. Somente assim, será possível a manutenção da vida humana de forma razoável e em consonância com os recursos naturais disponíveis e outras formas de vida.

Os processos de transformação de energia estão intimamente entrelaçados com as atividades antrópicas. A necessidade de energia, em suas diversas formas, é fundamental para o nosso desenvolvimento, e a busca por novas formas de transformação de energia deve ser uma constante. Portanto, para contribuir com esse propósito, o presente trabalho é desenvolvido. Com o intuito de buscar novas formas e possíveis associações para o emprego de processos de transformação e armazenamento de energia já conhecidos e desenvolvidos.

Os grupos geradores a Diesel, comumente encontrados hoje no mercado, são máquinas consolidadas e seguras do ponto de vista técnico. Desde que observadas orientações dos fabricantes, estas cumprem com êxito a função para a qual foram desenvolvidas. Estes estão fartamente disponíveis no mercado e possuem acessibilidade quanto a manutenção e peças de reposição, além de possuírem flexibilidade na operação. Estas máquinas podem operar de acordo com a carga ou em regimes fixos. As opções a Gás Natural já estão disponíveis no mercado porém ainda não é a opção mais usual. É possível citar que utilizar os grupos geradores de forma mais eficiente se traduz em obter mais oportunidades para a utilização dos motores a combustão interna, que hoje se encontram até certo ponto ameaçados frente as imposições de mudanças em nossa matriz energética. O Gás Natural é um combustível que ainda apresenta relativa segurança quanto ao seu fornecimento e possui alguma capilaridade em território nacional (1), o que facilitaria o emprego da estratégia proposta em outras localidades no Brasil.

A utilização de banco de baterias em conjunto com sistemas de geração de energia agrega versatilidade ao projeto. Baterias possuem capacidade de fornecimento de energia quase que instantâneo, atuando frente a picos inesperados de demanda. Além de introduzir alta taxa inercial ao sistema, característica que compensa o emprego dos geradores. Propostas de modelagem de sistemas híbridos utilizando grupos geradores e banco de baterias foram desenvolvidos em (2), (3) e (4). Nestes trabalhos a abordagem sempre foi utilizando grupos geradores a Diesel, e com pouco ou nenhum foco na influência da relação entre a carga e o consumo específico de combustível. Surge então a necessidade do dimensionamento e modelagem de sistemas compostos por geradores considerando a relação entre a carga e o consumo específico de combustível. Além de comparar a utilização de mais de um combustível, incluindo armazenamento em banco de baterias bem como a comparação entre as configurações possíveis.

Os objetivos do presente trabalho podem ser subdivididos em primários e secundários. Os objetivos primários são: desenvolver um modelo numérico determinístico, discretizado, e que seja capaz de prever o comportamento de um sistema de geração de energia elétrica composto por um grupo gerador a Gás Natural operando conjuntamente com um banco de baterias estacionárias, comparando-o com os geradores a Diesel largamente empregados no mercado brasileiro. Os objetivos secundários são: otimizar o consumo de combustível buscando formas alternativas de associação variando-se as especificações dos grupos geradores; dimensionar bancos de baterias cuja modelagem considere os fatores sazonais, regionais e econômicos.

Este trabalho se limita a estimar a viabilidade técnica e o potencial de redução de energia com esta alternativa híbrida (gerador a Gás Natural e bateria), não sendo realizada uma análise econômica da tecnologia, nem a análise do potencial de suprimento do Gás Natural em determinadas regiões. Todavia, a maior contribuição deste trabalho está em apresentar uma metodologia de estimativa de redução do uso de combustível, a partir da construção de uma linha base.

O capítulo a seguir cumpre a função de apresentar a metodologia utilizada para modelagem dos principais fatores envolvidos no problema bem como as especificações dos equipamentos e metodologia de controle do sistema. No capítulo 3 serão apresentados os resultados obtidos com o modelo e por fim, no capítulo 4, é apresentada a conclusão do trabalho.

## 2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do modelo proposto para o presente trabalho, que foi implementado no MATLAB/Simulink, foram necessários a caracterização e o dimensionamento dos parâmetros, que serão detalhados na sequência: 1) curvas de carga; 2) grupos geradores; 3) banco de baterias; e 4) controle do sistema.

### 2.1 Curva de carga

As curvas de carga para testes do modelo mostradas na Figura 1, foram geradas conforme perfis tipicamente encontrados na literatura (5) e (6). Os perfis de variações horárias impostas nestas curvas podem ser encontradas da mesma forma em curvas de carga de um determinado subgrupo de consumo, como no subgrupo A4, ou em curvas de carga de consumo total de uma determinada região (5). Os valores foram inicialmente estimados de forma a possibilitar o emprego de grupos geradores com capacidades entre 5,0 e 10,0 MW, principalmente devido à disponibilidade de dados de consumo específico destes equipamentos.

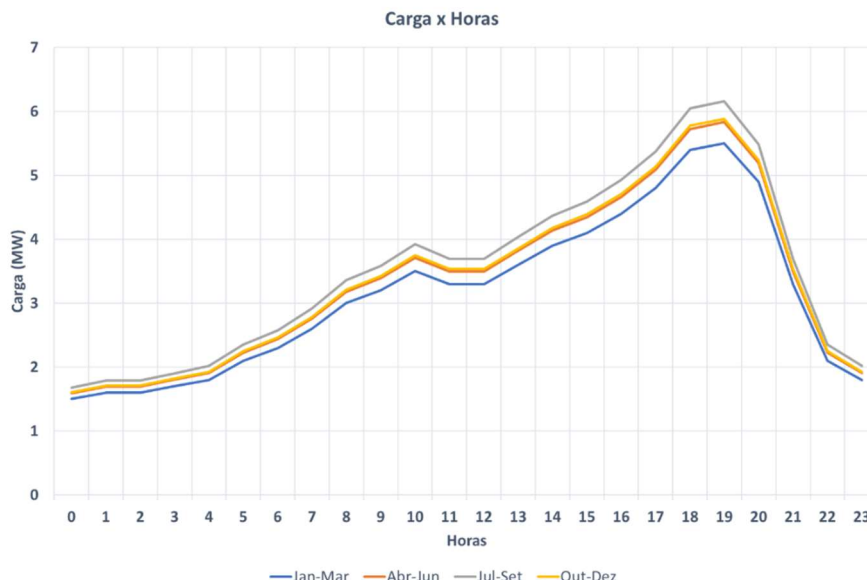


FIGURA 1: Curvas de carga horária (autor).

### 2.2 Grupos geradores

Partindo-se das curvas de carga previamente determinadas, pode-se então dimensionar os grupos geradores (a Diesel e a Gás Natural). Para o dimensionamento dos grupos geradores para os casos nos quais não são considerados a utilização do banco de baterias (gerador a Diesel) seguiu-se padrões geralmente impostos por fabricantes desse tipo de equipamento. Ocorre que para diferentes metodologias de emprego de grupos geradores,

existem diferentes classificações e considerações a serem utilizadas, sendo estas distintas para geradores de uso esporádico, recorrente ou contínuo. Para geradores de uso esporádico, denominados “stand-by” a potência do grupo gerador utilizado deve ser igual a potência máxima observada nas curvas de carga. Para geradores de uso com maior intensidade, denominados “prime” ou para geradores de uso contínuo, é necessário que a potência dos mesmos seja maior do que no caso anterior, ou seja, se o grupo gerador está submetido a maior número de solicitações ao longo do tempo, a sua potência deve ser maior do que a potência máxima observada nas curvas de carga. Dessa forma, é possível criar cenários nos quais as máquinas operem com alguma folga, evitando assim, desgaste excessivo e/ou danos precoces ao equipamento. Um valor tipicamente empregado por fabricantes para o incremento de potência do grupo gerador pode estar em torno de 8% para geradores “prime” e 18% para geradores de uso contínuo (7). Para o dimensionamento dos grupos geradores para os casos nos quais são considerados a utilização do banco de baterias (gerador a Gás Natural), buscou-se reduzir ao máximo a potência estimada no caso anterior e inserir o banco de baterias de forma que ainda fosse possível atender a demanda com a combinação entre a energia proveniente do grupo gerador e do banco de baterias. Para a especificação dos grupos geradores considerou-se então uma combinação entre os valores determinados através da metodologia supracitada, bem como a disponibilidade dos dados referentes aos geradores listados pelos catálogos do fabricante considerado para esse trabalho (8) e (9). Logo, é possível o dimensionamento das máquinas visando suplantare a demanda imposta no sistema (Figura 1).

### 2.2.1 Consumo específico de combustível

O consumo específico de combustível para cada gerador, em cada intervalo de tempo analisado, depende diretamente das respectivas curvas de consumo específico consideradas para cada caso. Com a potência demandada em cada intervalo de tempo, e com a utilização das eficiências nos processos de conversão de energia, temos a determinação da carga no grupo gerador. Com a carga observada no grupo gerador é então possível determinar o consumo específico de combustível no intervalo de tempo em questão. A seguir o equacionamento para o consumo específico dos geradores a Diesel (eq. 1) e Gás Natural (eq. 2) bem como para a determinação da carga imposta ao grupo gerador (eq. 3).

$$SFC_{DI}(t) = 21.78865 - 1.077804 * EL(t) + 0.03410205 * EL(t)^2 - 0.0005380345 * EL(t)^3 + 0.000004149239 * EL(t)^4 - 0.00000001241621 * EL(t)^5 \quad (1)$$

$$SFC_{GN}(t) = 21.4486 - 1.052416 * EL(t) + 0.03301899 * EL(t)^2 - 0.0005143865 * EL(t)^3 + 0.000003892528 * EL(t)^4 - 0.00000001141562 * EL(t)^5 \quad (2)$$

$$EL(t) = \frac{P_d(t)}{\eta_{ad} \times \eta_{da}} \times \frac{1}{P_{nom}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$SFC(t)$  = consumo específico de combustível (MJ/kWh)

$EL(t)$  = carga no grupo gerador (%)

$P_d(t)$  = potência demandada (kW)

$\eta_{ad}$  = eficiência da conversão tensão alternada x contínua (-)

$\eta_{da}$  = eficiência da conversão tensão contínua x alternada (-)

$P_{nom}$  = potência nominal do grupo gerador (kW)

As curvas de consumo específico presentes na Figura 2, e que foram consideradas no presente trabalho, são extraídas de manuais da Wartsila (8) (9). Para simples comparação entre os casos de interesse os valores foram convertidos para a mesma unidade de energia utilizando o poder calorífico inferior do respectivo combustível.

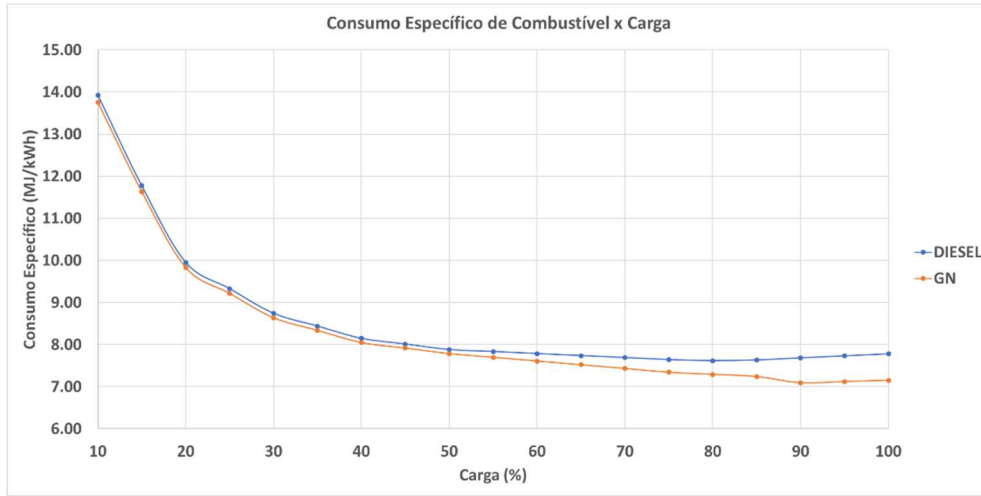


FIGURA 2: Consumo específico de combustível (adaptado de 8 e 9).

Nestes manuais, estão presentes os valores de consumo específicos para os grupos geradores movidos a Diesel e a Gás Natural. Em ambos os casos, os valores foram reportados para condições ideais de testes, seguindo a norma ISO 15550:2002, para os percentuais de 50, 75, 85 e 100% de carga do grupo gerador, e considerando os seguintes valores de poder calorífico inferior: 42.700 kJ/kg para o Diesel e 49.700 kJ/kg para o Gás Natural. Para determinação dos valores do consumo específico de combustível para valores inferiores a 50% de carga, e por consequência, determinação da curva completa de consumo específico de combustível, os valores foram incrementados na mesma proporção de valores reais reportados na literatura (10).

Como os valores reportados pelo fabricante se referem a condições ideais de testes, uma correção no consumo específico de combustível se faz necessário. É possível encontrar na literatura (11) trabalhos que utilizam curvas parecidas para modelagem do consumo específico de combustível e que recorreram a ajustes neste tipo de curva. No caso, os valores de correção propostos pelo autor são de incrementos na ordem de 5 e 8% no consumo específico de combustível para operações reais de grupos geradores. Neste trabalho utilizou-se o incremento de 5% no consumo específico para todos os geradores modelados.

## 2.2.2 Eficiência

Como mencionado anteriormente, um dos motivadores do presente trabalho é criar estratégias para a operação de grupos geradores de forma mais eficiente. Para que seja possível avaliar os prováveis ganhos de eficiência, foi necessário o cálculo da eficiência do grupo gerador a cada instante de tempo (eq. 4), o qual é dado pela seguinte equação.

$$\eta(t) = \frac{E_g(t)}{E_g(t) \times SFC(t) \times PCI} = \frac{1}{SFC(t) \times PCI} \quad (4)$$

Onde:

$E_g(t)$  = energia gerada (kWh)

$SFC$  = consumo específico de combustível (kg/kWh)

$PCI$  = poder calorífico inferior (kWh/kg)

## 2.3 Banco de baterias

Para modelagem do comportamento do bando de baterias são considerados a variação da energia no banco de baterias, bem como as taxas de carga e descarga do mesmo.

### 2.3.1 Energia

Para o cálculo da variação da energia foram considerados: a energia da bateria no instante imediatamente anterior, e a energia para carga e descarga do banco nos respectivos momentos em questão. Foram também consideradas as eficiências de carga e descarga (eq. 5), fazendo sempre referência as especificações do fabricante.

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1) + E_{bin}(t) \times \eta_c - \frac{E_{bout}(t)}{\eta_d} \quad (5)$$

Onde:

$E_{bat}(t)$  = energia armazenada no banco de baterias (kWh)

$E_{bat}(t - 1)$  = energia armazenada na bateria no instante anterior (kWh)

$E_{bin}(t)$  = energia para carga do banco de baterias (kWh)

$E_{bout}(t)$  = energia utilizada do banco de baterias (kWh)

$\eta_c$  = eficiência de carga do banco de baterias (—)

$\eta_d$  = eficiência de descarga do banco de baterias (—)

### 2.3.2 Taxas de carga e descarga

Para o cálculo das taxas de carga e descarga do banco de bateria, foram considerados a energia na bateria no instante atual, a energia na bateria no instante imediatamente anterior e a capacidade da bateria, conforme eq. 6. Essa modelagem é necessária para que seja possível manter as taxas sempre em valores recomendados pelo fabricante.

$$C - Rate(t) = \frac{E_{bat}(t) - E_{bat}(t - 1)}{Cap_{bat}} \quad (6)$$

Onde:

$E_{bat}(t)$  = energia armazenada no banco de baterias (kWh)

$E_{bat}(t - 1)$  = energia armazenada na bateria no instante anterior (kWh)

$Cap_{bat}$  = capacidade de armazenamento do banco de baterias (kWh)

### 2.4 Algoritmo

O sistema modelado, necessariamente apresenta variações ao longo do tempo que são impostas pela carga. As imposições do perfil de carga, fazem variar as solicitações ao grupo gerador bem como ao banco de baterias. Se faz então necessário uma estratégia de controle para gerir as alterações do sistema de forma que possibilite a obtenção do comportamento esperado. Para a implementação da estratégia de controle do sistema, foram necessários então a determinação de estados do sistema, considerando o estado de cada componente individualmente. Primeiramente é avaliada a demanda imposta pelo perfil de carga, visando identificar a possibilidade do suprimento da carga somente com o grupo gerador e/ou se existe a necessidade de complementação através da utilização do banco de baterias. Posteriormente, e com o resultado da indagação anterior, é avaliado o estado de carga das baterias, visando identificar a possibilidade de complementação de carga, bem como os momentos de carga e descarga. Com a combinação dos fatores supracitados, surge então o seguinte conjunto de regras:

- Estado 1: se a demanda for menor do que a potência máxima do gerador, e baterias estão descarregadas  
Então gerador opera fixo (em alta carga) suprimindo a demanda e carregando o banco de baterias.
- Estado 2: se a demanda for menor do que a potência máxima do gerador, e baterias estão parcialmente carregadas  
Então gerador opera fixo (em alta carga) suprimindo a demanda e carregando o banco de baterias.
- Estado 3: se a demanda for menor do que a potência máxima do gerador, e baterias estão carregadas  
Então gerador opera oscilando de acordo com a carga.
- Estado 4: se a demanda se aproximar da potência máxima do gerador, e baterias estão carregadas  
Então gerador opera fixo (em alta carga) em conjunto com o banco baterias para suprir a demanda.
- Estado 5: se a demanda se aproximar da potência máxima do gerador, e baterias estão parcialmente carregadas  
Então gerador opera fixo (em alta carga) em conjunto com o banco baterias para suprir a demanda.
- Estado 6: se a demanda se aproximar da potência máxima do gerador, e baterias estão descarregadas  
Então gerador opera fixo (em alta carga) suprimindo a demanda e carregando o banco de baterias.

Logo como pode ser observado, nos estados 1, 2 e 6 o banco de baterias está descarregado ou com carga parcial, nesse caso o grupo gerador opera fixo em patamares elevados de carga, suprimindo a demanda e efetuando o carregamento do banco de baterias com o excedente de geração. No estado 3 o banco de baterias está carregado e o grupo gerador opera oscilando de acordo com a demanda de carga. Nos estados 4 e 5, a demanda se aproxima do limite superior de fornecimento pelo grupo gerador, ou seja, é necessário a utilização do banco de baterias de forma que seja possível suprir a demanda imposta ao sistema.

### 2.5 Especificações técnicas para cálculo da energia conservada

#### 2.5.1 Grupos geradores

Inicialmente foram dimensionados os grupos geradores para construção dos casos que podem ser considerados como referência para o presente trabalho. Foi necessário considerar o que é de fato praticado do ponto de vista comercial ou “business as usual”, para a determinação da linha de base do trabalho proposto. Nesse caso, para geração de energia elétrica para fins do uso em comércio e indústria de menor porte, o mais usual é a utilização de grupos geradores movidos a Diesel, sem a utilização de sistemas de armazenamento de energia, com intuito de reduzir o consumo da energia no horário de ponta, que para o Grupo A é bem mais cara. Portanto, o grupo gerador a Diesel foi o primeiro a ser dimensionado e será considerado como tecnologia “business as usual”, para estimativa da linha de base. Em seguida, será feito o dimensionamento do grupo gerador a Gás Natural, inicialmente, sem a utilização do banco de baterias.

Posteriormente, para os dois últimos casos, foram ainda considerados grupos geradores movidos a Gás Natural e agora com a adição do banco de baterias para complementação da carga. A diferença entre os dois últimos casos reside no fato de que a potência do grupo gerador foi reduzida e o banco de baterias foi incrementado. O dimensionamento dos grupos geradores foi no intuito de reduzir ao máximo a potência dos mesmos e inserir o banco de baterias, possibilitando dessa forma a operação com os geradores em patamares de carga mais elevados reduzindo dessa forma o consumo específico de combustível. Sendo as especificações:

- Caso 1: grupo gerador a Diesel 8.600 kW;
- Caso 2: grupo gerador a Gás Natural 7.120 kW;
- Caso 3: grupo gerador a Gás Natural 6.104 kW + banco de baterias (2,5 MWh); e
- Caso 4: grupo gerador a Gás Natural 5.088 kW + banco de baterias (10,0 MWh).

### 2.5.1 Banco de baterias

Para o dimensionamento da capacidade total dos bancos de baterias considerados, foi necessário avaliar o sistema no pior cenário possível com relação a curva de carga considerada. A capacidade total do banco de baterias é então dimensionada para suprir as solicitações impostas pela curva de demanda nos momentos nos quais os valores impostos estão acima do patamar máximo de geração pelos grupos geradores. Ou seja, a operação do banco de baterias de forma que seja possível realizar os cortes nos picos da curva de demanda. O dimensionamento também foi realizado de forma a manter o estado de carga do banco de baterias entre 20 e 100% de carga, além de respeitar as taxas de carga e descarga impostas pelo fabricante. Foi considerada uma solução em armazenamento de energia comercializada pela SAFT. O banco de baterias denominado “Intensium Max 20 High Energy”, é uma solução pronta para armazenamento de energia composta por baterias de íons de lítio (12). A apresentação do produto é em formato de container contando com módulos de controle de potência e sistema de arrefecimento integrados. Cada módulo tem a capacidade total nominal de 2,5 MWh, com taxas nominais de carga e descarga de 0,5C e eficiência de ciclo máxima de 96%.

Os grupos geradores para os Casos 3 e 4 foram dimensionados com base na redução de sua potência total de geração e o sistema foi complementado com os bancos de baterias. Ou seja, o maior grupo gerador a Gás Natural está presente no Caso 2 (ainda sem considerar os bancos de baterias), posteriormente, tem-se um gerador menor no Caso 3 e, por fim, um gerador ainda menor no Caso 4. A capacidade total dos bancos de baterias foram as seguintes: para o Caso 3: um único container com capacidade de 2,5 MWh; e para o Caso 4: quatro containers com capacidade total de 10,0 MWh.

## 3.0 RESULTADOS

### 3.1 Consumo Específico de Combustível

Para que seja possível a comparação entre a variação do consumo específico de combustível entre todos os casos analisados, os resultados foram convertidos para MJ/kWh, utilizando de forma conservadora, o poder calorífico inferior de cada combustível em questão. Como pode ser observado na Figura 3, o consumo específico em cada um dos casos varia entre os seguintes patamares:

- Caso 1 (Diesel): 7,994 e 10,170 MJ/kWh, com valor médio de 8,725 MJ/kWh.
- Caso 2 (Gás Natural): 7,477 e 9,323 MJ/kWh, com valor médio de 8,233 MJ/kWh.
- Caso 3 (GN + Bateria 2,5 MWh): 7,545 e 8,881 MJ/kWh, com valor médio de 7,991 MJ/kWh.
- Caso 4 (GN + Bateria 10,0 MWh): 7,542 e 8,535 MJ/kWh, com valor médio de 7,745 MJ/kWh.

Os valores mais representativos com relação a discrepância dos valores observados entre a linha de base (grupo gerador a Diesel sem banco de baterias) e os demais casos, ou seja, a maior redução de consumo específico observada no período simulado ocorre quando a constante de tempo alcança 24 horas, e valem:

- Caso 2: redução de 0,847 MJ/kWh, equivalentes a 8,33%.
- Caso 3: redução de 1,289 MJ/kWh, equivalentes a 12,67%.
- Caso 4: redução de 2,625 MJ/kWh, equivalentes a 25,81%.

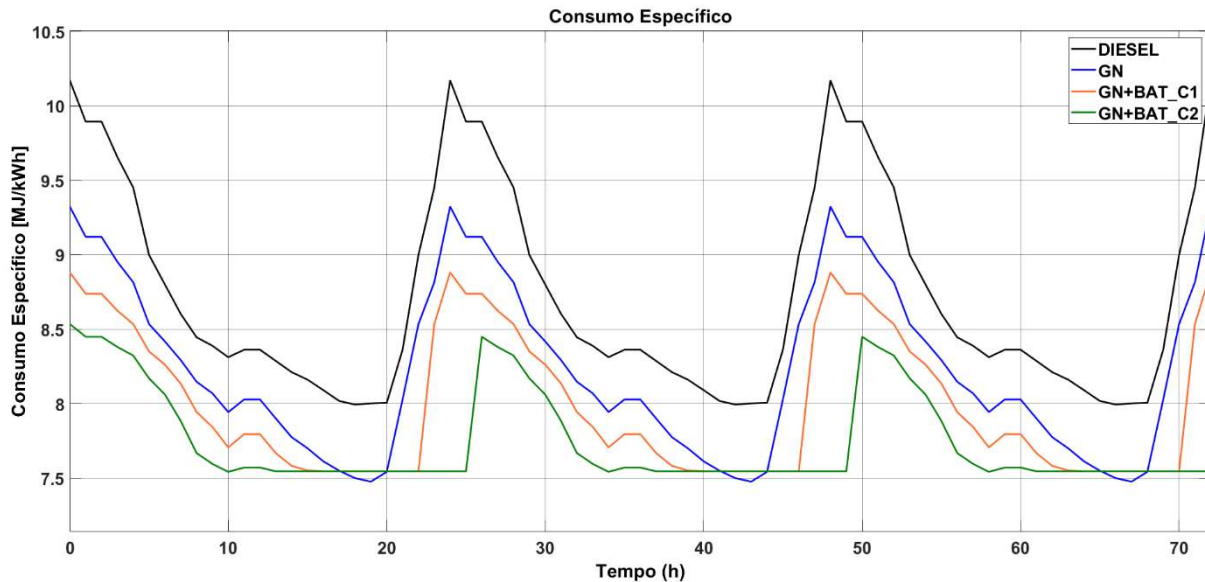


FIGURA 3: Resultados Consumo Específico.

### 3.2 Eficiência Grupo Gerador

Novamente para comparação entre os casos, foram gerados os gráficos de eficiência dos grupos geradores para os cenários analisados, que constam na Figura 4 a seguir. Como pode ser observado no gráfico a seguir, a eficiência em cada um dos casos varia entre os seguintes patamares:

- Caso 1 (Diesel): 35,23 e 44,83%, com valor médio de 41,32%.
- Caso 2 (Gás Natural): 38,78 e 48,36%, com valor médio de 44,12%.
- Caso 3 (GN + Bateria 2,5 MWh): 40,71 e 47,91%, com valor médio de 45,39%.
- Caso 4 (GN + Bateria 10,0 MWh): 42,36 e 47,93%, com valor médio de 46,76%.

Os valores mais representativos com relação a discrepância dos valores observados entre a linha de base (grupo gerador a Diesel sem banco de baterias) e os demais casos, ou seja, o maior incremento na eficiência observada no período simulado ocorre quando a constante de tempo alcança 24 horas, e valem:

- Caso 2: aumento de 3,58%, equivalentes a 10,08%.
- Caso 3: aumento de 5,48%, equivalentes a 15,55%.
- Caso 4: aumento de 12,68%, equivalentes a 35,99%.

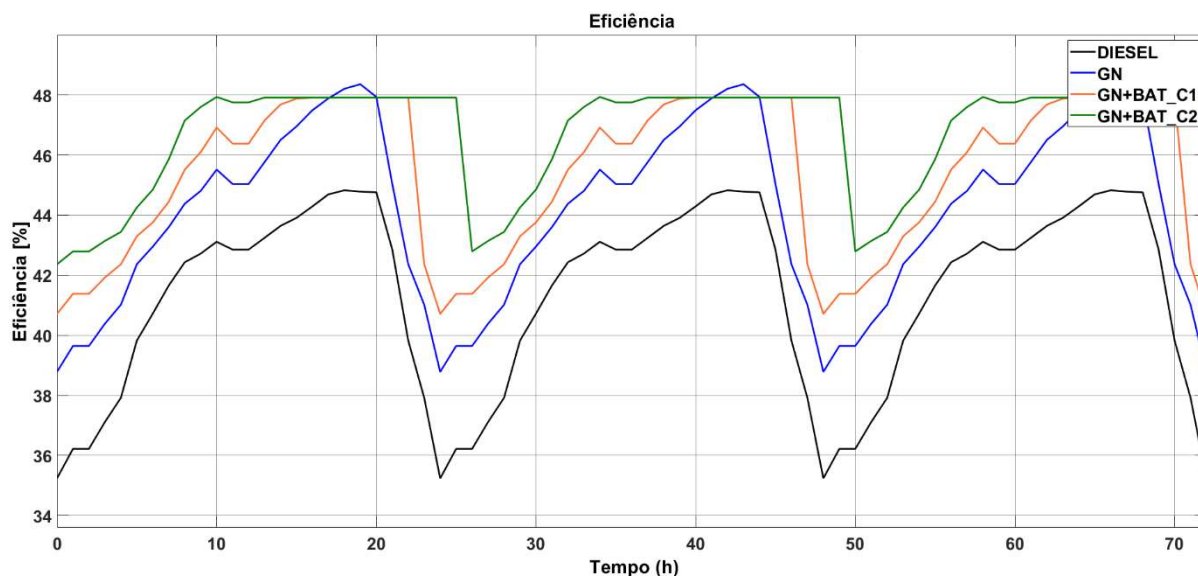


FIGURA 4: Resultados Eficiência Grupos Geradores.

#### 4.0 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento do presente trabalho foi possível gerar um modelo numérico determinístico, discretizado, e que seja capaz de prever o comportamento de um sistema de geração de energia elétrica composto por grupos geradores operando conjuntamente com banco de baterias estacionárias. Foi também efetuado o dimensionamento de quatro sistemas para as simulações compostos por: 1) Gerador a Diesel; 2) Gerador a Gás Natural; 3) e 4) Gerador a Gás Natural e banco de baterias.

Com relação aos resultados referentes ao consumo específico de combustível, é possível observar que os valores médios são: 8,725 MJ/kWh para o Caso 1, 8,233 MJ/kWh para o Caso 2, 7,991 MJ/kWh para o Caso 3 e 7,745 MJ/kWh para o Caso 4. Logo no melhor cenário de comparação entre as médias a redução pode ser de até 11,23%. Em relação aos resultados referentes a eficiência do grupo gerador, é possível observar que os valores médios são: 41,32% para o Caso 1, 44,12% para o Caso 2, 45,39% para o Caso 3 e 46,76% para o Caso 4. Logo no melhor cenário de comparação entre as médias o aumento de eficiência pode ser de até 13,16%. O que é possível notar é que com o decremento da capacidade do grupo gerador e o incremento do banco de baterias, necessariamente o gerador trabalha em patamares de carga mais elevados, que possibilita a queda no consumo específico médio da instalação e o aumento da eficiência do sistema. Estes resultados mostram que em uma primeira análise é possível criar soluções para processos de conversão de energia utilizando as tecnologias disponíveis de formas mais eficientes.

Por fim, como possíveis indicações de trabalhos futuros a partir da presente solução, sugerem-se: (i) para refino do modelo, incluir na modelagem os fatores de envelhecimento dos grupos geradores e bancos de baterias, a variação da eficiência do banco de baterias com o estado de carga, e a variação do consumo específico de combustível de acordo com a temperatura ambiente; (ii) considerando as limitações do estudo, desenvolver estudos dos impactos ambiental e econômicos do modelo proposto, bem como analisar a viabilidade do potencial de suprimento do Gás Natural em plantas que utilizam grupo Diesel para suprimento de energia.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte EPE 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-415/PIG%20-%20Plano%20Indicativo%20de%20Gasodutos%20de%20Transporte\\_EPE2019.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-415/PIG%20-%20Plano%20Indicativo%20de%20Gasodutos%20de%20Transporte_EPE2019.pdf)
- (2) Omid Mahian, Mohammad Javidmehr, Alibakhsh Kasaeian, Sassan Mohaseb, Mouzhan Panahi, Optimal sizing and performance assessment of a hybrid combined heat and power system with energy storage for residential



buildings, *Energy Conversion and Management*, Volume 211, 2020, 112751, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112751>.

(3) Wheeler, K. R., *Efficient Operation of Diesel Generator Sets in Remote Environments*. Dissertação (mestrado). Virginia Tech, 2017.

(4) André Malheiro, Pedro M. Castro, Ricardo M. Lima, Ana Estanqueiro, Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems, *Renewable Energy*, Volume 83, 2015, Pages 646-657, ISSN 0960-1481.

(5) Bajay, Sergio & Jannuzzi, Gilberto & Heideier, Raphael & Vilela, Izana & Paccola, José & Gomes, Rodolfo. (2018). *Geração distribuída e eficiência energética: Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro*.

(6) Queiroz, Patrícia Valéria Sathler de Queiroz; Souza, Reinaldo Castro; Frota, Maurício Nogueira. *Mensuração do consumo de energia elétrica: algoritmo para detecção de potenciais usuários da termoacumulação como alternativa para deslocamento de carga*. Rio de Janeiro, 2011. 98p. Dissertação de Mestrado

(7) Catálogo do fabricante GERMEK. Disponível em: <http://www.germek.com.br/geracao-de-energia/gkg-grupo-de-gerador-biogas-agronegocio>, acessado em dezembro de 2020.

(8) Catálogo do fabricante WARTSILA para grupos geradores Diesel (WARTSILA 32). Disponível em: <https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets>

(9) Catálogo do fabricante WARTSILA para grupos geradores Gás Natural (WARTSILA 31 SG). Disponível em: <https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets>

(10) Documento Oficial ACEP – Alaska Center for Energy and Power. *Diesel Genator Fuel Consumption Under Dynamic Loading* 2017.

(11) Eleftherios K. Dedes, Dominic A. Hudson, Stephen R. Turnock. *Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping*. *Energy Policy*, 2012.

(12) Catálogo do fabricante de baterias SAFT. Disponível em: [https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/intensium%C2%AE-max-20-high-energy?per\\_page=48](https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/intensium%C2%AE-max-20-high-energy?per_page=48)

## DADOS BIOGRÁFICOS



Marcos possui experiência profissional na indústria de gases e de transformação, onde atuou com desenvolvimento e digitalização de processos e relatórios de indicadores de desempenho, além do gerenciamento de banco de dados em sistemas ERP. Atualmente é aluno de mestrado em termociências no Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, e desenvolve a dissertação e trabalhos com temas relacionados à modelagem e simulação numérica computacional de sistemas diversos, com foco em eficiência energética, medição e verificação e novas formas de associação entre sistemas de transformação e armazenamento de energia.

## (2) RODRIGO FLORA CALILI

Rodrigo Flora Calili atualmente é professor adjunto do Programa de Pós-Graduação em Metrologia e do Mestrado Profissional de Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Tem Pós-doutorado em Metrologia pela PUC-Rio (2016) e é Doutor em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio (2013) com ênfase em Sistemas de Energia, tendo feito um ano de doutorado sanduíche na França na École de Mines de Paris (2012), mestre em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio (2006) com ênfase Métodos e Apoio à Decisão e graduado em Engenharia Elétrica pela UFJF (2003). Trabalhou e trabalha como consultor e pesquisador em diversos projetos de empresas setor elétrico.

## (3) SERGIO LEAL BRAGA

Professor da PUC-Rio, trabalhou na Purdue University. Atua na área de energia, orientou mais de 110 Teses de Mestrado, Doutorado, Pós-doutorado e trabalhos de graduação. Autor de mais de 200 artigos científicos. Convênios de cooperação científica com entidades na Alemanha, Argentina, França, Itália e Peru. Diretor do Instituto Tecnológico e Laboratório de Engenharia Veicular. Membro do Comitê Executivo do Instituto de Energia da PUC-Rio. Construiu o CDEV - Centro de Desenvolvimento em Energia e Veículos onde são desenvolvidas pesquisas em energias renováveis: biocombustíveis, hidrogênio, solar e outras. Cientista do Nosso Estado pela FAPERJ e Membro da Academia Nacional de Engenharia.