

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2013

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

FABRÍCIO RAMOS DEL CARLO

**ANÁLISE EXERGONECONÔMICA APLICADA A MICROCOGERAÇÃO EM
CONDOMÍNIOS RESIDENCIAIS**

Guaratinguetá
2013

FABRÍCIO RAMOS DEL CARLO

ANÁLISE EXERGOECONÔMICA APLICADA A MICROCOGERAÇÃO EM
CONDOMÍNIOS RESIDENCIAIS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para o título de Doutor em Engenharia
Mecânica na área de Transmissão e Conversão de
Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues de Holanda

Guaratinguetá
2013

D345a	<p data-bbox="352 1124 702 1160">Del Carlo, Fabrício Ramos</p> <p data-bbox="352 1160 1268 1234">Análise exergoeconômica aplicada a microgeração em condomínios residenciais / Fabrício Ramos Del Carlo - Guaratinguetá : [s.n.], 2013.</p> <p data-bbox="400 1234 512 1270">92 f. : il.</p> <p data-bbox="400 1270 635 1305">Bibliografia: f. 82</p> <p data-bbox="352 1346 1326 1420">Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.</p> <p data-bbox="400 1420 1098 1456">Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Baliestieri</p> <p data-bbox="400 1456 1114 1491">Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues de Holanda</p> <p data-bbox="400 1565 1326 1639">1. Energia elétrica e calor – Cogeração 2. Células a combustível 3. Motores de combustão interna I. Título</p> <p data-bbox="1086 1675 1326 1711">CDU 536.72(043)</p>
-------	---

FABRICIO RAMOS DEL CARLO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

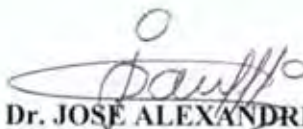
BANCA EXAMINADORA:



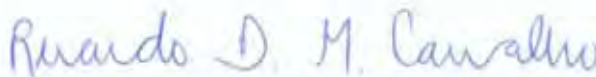
Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador / Unesp-Feg




Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Unesp-Feg



Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Unesp-Feg



Prof. Dr. RICARDO DIAS MARTINS DE CARVALHO
UNIFEI



PROF. DR. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU

Março de 2013

DADOS CURRICULARES

FABRÍCIO RAMOS DEL CARLO

NASCIMENTO	28.11.1979 – POÁ / SP
FILIAÇÃO	Edson Del Carlo Wilma Ramos Del Carlo
1994/1998	Ensino Médio Técnico em Mecânica na ETE Presidente Vargas – Mogi das Cruzes
1999/2004	Graduação em Engenharia Mecânica na UMC – Universidade de Mogi das Cruzes
2004/2007	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP
2008/2012	Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP.

DEDICATÓRIA

de modo especial, à minha mãe Wilma e meu pai Edson,
que com seus cuidados, foram os grandes incentivadores
para que eu continuasse no curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço as pessoas que me auxiliaram na execução deste trabalho e também das instituições nas quais consegui obter informações para esta tese.

Em especial, com toda sinceridade, aos meus professores, pelo apoio e incentivo, que foram fundamentais para a conclusão de mais esta etapa.

Ainda, ao Professor Doutor José Antônio Perrella Balestieri, meu orientador, por sua paciência durante minhas consultas, pela leitura crítica e apresentação da obra e pelo companheirismo ao longo desta jornada.

Ao amigo Celso Ricardo dos Santos, que possibilitou a flexibilização nos horários de trabalho, permitindo assim a minha presença nas aulas e orientações necessárias para a conclusão desta obra.

À minha mãe e meu pai, que convivem comigo e que me ajudam a cumprir com meu dever, e pela compreensão de minha ausência durante este período.

Ao amigo Gabriel Costa, que participou ativamente das etapas de pesquisa e revisão deste, além de grande incentivador.

À Gian Carla Giaretta, minha namorada e companheira, pela paciência e pela compreensão da minha ausência em muitos momentos, devido à minha dedicação aos estudos.

EPÍGRAFE

Erros são, no final das contas, fundamentos da verdade.
Se um homem não sabe o que uma coisa é, já é um
avanço do conhecimento saber o que ela não é.

Carl Jung

CARLO, FABRÍCIO R. **Análise exergoeconômica aplicada a microcogeração em condomínios residenciais**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

A descentralização na geração de energia tem sido proposta em nível mundial para diferentes situações como forma de se alcançar maior confiabilidade de geração elétrica e melhores condições ambientais. Nesse sentido, em diversos países (o Brasil inclusive) tem sido proposta a utilização de sistemas de geração distribuída, com incentivo ao emprego de fontes renováveis de energia, sendo a microcogeração e a minigeração algumas das possibilidades tecnológicas disponíveis. Comprovar a elegibilidade econômica de uma alternativa de minigeração, utilizando métodos que permitam avaliar o custo exergoeconômico em busca de substituir tecnologias consagradas pela instalação de novas tecnologias, é objeto principal perseguido neste trabalho. A superestrutura de minicogeração analisada é composta de células-combustível e motores de combustão interna com fins de geração de energia para um condomínio multirresidencial. A Teoria do Custo Exergético (TCE) foi utilizada e avalia com precisão os custos exergoeconômicos que, aliados aos métodos financeiros orçamentários (taxa interna de retorno, valor presente líquido, tempo de retorno), permitem a demonstração da viabilidade econômica. Aliado a estes métodos, como complemento na tomada de decisão, há o estudo de otimização multitemporal, que permite a seleção de apenas um dos doze equipamentos propostos, além de indicar qual o melhor combustível a ser utilizado como fonte primária de energia. A modelagem da superestrutura demonstra também a possibilidade de comercialização dos produtos com a concessionária, permitindo tanto vender o excedente de produção quanto comprar energia elétrica em alguns momentos, respeitando as flutuações de consumo ao longo do dia e em sazonalidades distintas. É possível constatar que as células-combustível entregam a energia elétrica mais custosa ao se comparada com os MCI, porém estes custos são equiparados com a entrega do volume de água quente a custos mais módicos. Os dados demonstram que é mais vantajosa a utilização da célula-combustível movida a hidrogênio para compor a superestrutura final, uma vez que o Brasil entra em uma nova etapa através de suas resoluções normativas incentivando o uso racional de energia e da utilização da microcogeração para residências.

PALAVRAS-CHAVE: Cogeração, micro geração, célula combustível, motor de combustão interna, residencial, otimização.

CARLO, FABRÍCIO R. **Exergoeconomic analysis applied to a microgeneration in a residential condominium**. 2012. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

Decentralization in power generation has been proposed worldwide for different situations as a way to achieve greater reliability of electricity generation and improved environmental conditions. Thus, in many countries (including Brazil) the use of distributed generation systems has been proposed, encouraging the use of renewable energy sources, the micro and mini-generation being some of the technological available possibilities. The main object pursued in this work is to check the eligibility of an economic mini-generation alternative based on methods to evaluate the exergoeconomic cost of replacing consecrated technologies by new technologies. The superstructure is comprised of fuel cells and internal combustion engines for the purpose of generating energy to a residential condominium. The Exergetic Cost Theory was used and accurately assess the exergoeconomic costs that, coupled with financial budgeting methods (internal rate of return, net present value and payback time), allow demonstrating the economic viability. In addition to these methods, a multi-temporal optimization method, which allows the selection of only one of the twelve proposed equipment, besides indicating the best fuel to be used as a primary energy source, was also modeled. The modeling of the superstructure also demonstrates the possibility of commercializing products with the concessionaire, allowing both sell excess production as buying electricity at times, respecting the fluctuations of consumption throughout the day and in different seasons. It can be seen that the fuel cells deliver more expensive electricity when compared with combustion engines, but these costs are equated with the delivery volume of hot water at more affordable costs. The data show that it is more advantageous to use the hydrogen-powered fuel cell to compose the superstructure, since Brazil is entering a new phase through its normative resolutions that encourages the rational use of energy and the use of micro for homes.

KEYWORDS: Cogeneration, micro generation, fuel cell, internal combustion engine, residential self-generation, optimal operation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Flutuação de consumo de energia elétrica.....	26
Figura 2 - Flutuação de consumo de água quente.....	26
Figura 3 - Comparativo de economia anual para diferentes micro centrais de cogeraçã	29
Figura 4 - Configuração utilizando a célula-combustível de 2,8 kW (SOFC).....	30
Figura 5 - Superestrutura de suprimento de energia.....	31
Figura 6 - Volume de controle.....	44
Figura 7 - Curva de “ <i>trade-off</i> ” para custos elétrico e térmico em centrais de cogeraçã	46
Figura 8 - Fluxos de saída da turbina a vapor (fazem parte do insumo).....	49
Figura 9 - Fluxos de saída da turbina a gás (fazem parte do insumo).....	49
Figura 10 - Fluxos de saída da caldeira de recuperação (fazem parte do insumo).....	49
Figura 11 - Fluxos de saída da turbina a gás (fazem parte do insumo).....	49
Figura 12 - Superestrutura proposta.....	55
Figura 13 - Fluxos da célula-combustível.....	59
Figura 14 - Fluxos do motor de combustão interna.....	59
Figura 15 - Fluxos do reservatório de água quente.....	60
Figura 16 - Fluxos da bateria.....	60
Figura 17 - Insumos que compõem a bateria.....	61
Figura 18 - Insumos que compõem a bateria.....	61
Figura 19 - Produtos do MCI.....	62
Figura 20 - Produtos da célula-combustível.....	62
Figura 21 - Produtos que compõem a bateria.....	62
Figura 22 - Curva de consumo de energia elétrica.....	67

Figura 23 - Curva de consumo de água quente.....	68
Figura 24 - Superestrutura com a seleção do equipamento gerador	73
Figura 25 - Consumo de energia elétrica do condomínio residencial em dois períodos distintos (verão e inverno).....	74
Figura 26 - Consumo de água quente do condomínio residencial em dois períodos distintos (verão e inverno).....	75
Figura 27 - Níveis de profundidade dos estudos de viabilidade	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de cogeração e ponderação.....	37
Tabela 2 - Consumo de energia elétrica horário do condomínio	52
Tabela 3 - Consumo de água quente horário do condomínio	52
Tabela 4 - Seleção dos equipamentos da superestrutura	56
Tabela 5 - Dados termodinâmicos da configuração.....	57
Tabela 6 - Matriz de incidência modificada (A) do motor MC1.....	64
Tabela 7 - Matriz de incidência modificada inversa (A^{-1}) do motor MC1.....	64
Tabela 8 - Matriz multiplicação Y do motor MC1.....	64
Tabela 9 - Custo exergético unitário do motor MC1.....	65
Tabela 10 - Fluxo de caixa para a obtenção da TIR, VPL e PB	66
Tabela 11 - Custo dos Insumos	68
Tabela 12 - Custo dos produtos da central de cogeração	72
Tabela 13 - Comparação entre TIR, VPL e PB	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
B	- Exergia
BAT	- Banco de Baterias
DI	- Diesel
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
ECE	- Equação de Conservação de Energia
EE	- Energia Elétrica
ENCE	- Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EUA	- Estados Unidos da América
FC	- Célula-combustível
FCPM	- <i>Fuel Cell Próton Membrane</i>
GN	- Gás Natural
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia
Io	- Investimento Inicial
LABEEE	- Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
MCI	- Motor de Combustão Interna
MILP	- <i>Mixed Integer Programming</i>
MT	- Metanol
PB	- <i>Payback</i>
PBE	- Programa Brasileiro de Etiquetagem
PEMFC	- <i>Próton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
PMLI	- Programação Mista Linear Inteira
PRODIST	- Procedimentos de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional
PROINFA	- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RES	- Reservatório
RTQ-R	- Regulamento Técnico da Qualidade em Edificações Residenciais
SOFC	- <i>Solid Oxi Fuel Cell</i>
TCE	- Teoria do Custo Exergético
TIR	- Taxa Interna de Retorno
TMA	- Taxa Mínima de Atratividade
VC	- Volume de Controle
VP	- Valor Presente
VPL	- Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	- Vazão de Água	kg/s
$A_{Q_{FC}}$	- Água quente fornecida pela célula-combustível	kg/s
$A_{Q_{MCI}}$	- Água quente fornecida pelo motor de combustão interna	kg/s
B	- Exergia de um fluxo térmico	kW
B^*	- Custo exerético de um fluxo térmico	kW
B_{AFC}	- Exergia da água de entrada da célula-combustível	kW
B_{AMCI}	- Exergia da água de entrada do motor de combustão interna	kW
B_{ARFC}	- Exergia do ar de entrada da célula-combustível	kW
B_{ARMCI}	- Exergia do ar de entrada do motor de combustão interna	kW
$B_{Combustível FC}$	- Exergia do combustível utilizado na célula-combustível	kW
$B_{Combustível MCI}$	- Exergia do combustível utilizado no motor de combustão interna	kW
$B_{Compraenergiaelétrica}$	- Compra de energia elétrica da concessionária	kW
$B_{EnergiaelétricaFC}$	- Potência do conjunto célula-combustível	kW
$B_{EnergiaelétricaMCI}$	- Potência do conjunto motor de combustão interna	kW
$B_{exaustão}$	- Exergia dos gases de exaustão do motor de combustão interna	kW
$B_{perdaBAT}$	- Perdas referentes ao conjunto de baterias	kW
$B_{perdaFC}$	- Perdas referentes ao conjunto célula-combustível	kW
$B_{perdaMCI}$	- Perdas referentes ao conjunto motor de combustão interna	kW
$B_{perdaRES}$	- Perdas referentes ao reservatório de água quente	kW
$B_{vendaenergiaelétrica}$	- Venda de energia elétrica à concessionária	US\$/kWh
C	- Custo específico de um elemento	US\$/kWh
C_a	- Custo da água	US\$/kg
C_{comb}	- Custo do combustível	US\$/kg
$\dot{C}_{P,total}$	- Custo específico total dos produtos	US\$/kWh
$\dot{C}_{F,total}$	- Custo específico total dos combustíveis	US\$/kWh
\dot{C}_s	- Custo exerético nas saídas do VC	\$/GJ
\dot{C}_e	- Custo e exerético nas entradas do VC	\$/GJ
\dot{C}_w	- Custo exerético das potências	\$/GJ
\dot{C}_q	- Custo exerético de transferência de exergia	\$/GJ

Cj	- Custo energético de um determinado fluxo térmico	US\$
Cm _{MCI,FC}	-Custo de manutenção (motor de combustão, célula-combustível)	US\$/kWh
Comb _{MCI,FC}	- Vazão de combustível (motor de combustão, célula-combustível)	kg/h
CWC	- Custo da energia elétrica comprada da concessionária	US\$/kWh
CWV	- Custo da energia elétrica vendida à concessionária	US\$/kWh
DAQ	- Água quente consumida pelo condomínio residencial	kg/h
Dli	- Diesel	
DW	- Energia consumida pelo condomínio residencial	kWh
Ee	- Energia eletromecânica	MWh
Ef	- Energia disponibilizada pelo combustível	MWh
Et	- Energia térmica utilizada	MWh
F*	- Insumo	“-“
FC	- Fator de cogeração	“-“
g	- Aceleração da gravidade	m/s ²
Gni	- Gás Natural	“-“
H	- Entalpia do fluxo energetic	kJ/kg
H2i	- Hidrogênio	“-“
k*	- Custo exergetico unitário	kW
Mti	- Metanol	“-“
m	- Vazão em massa de fluxos energéticos (vapor, gases)	kg/s
P*	- Produto	“-“
Pot _{MCI,FC}	- Potência de trabalho (motor de combustão, célula-combustível)	kW
Q	- Calor líquido	Btu
\dot{Q}	- Taxa de calor transferida ao VC	kW
S	- Entropia	kJ/kg.K
T	- Temperatura	K
U	- Energia interna do sistema	J
V	- Velocidade do fluxo energético	m/s
V	- Volume quando à temperatura e pressão absolutos	m ³
W	- Potência líquida	kW

\dot{W}_e	- Potência de eixo transferida ao volume de controle	kW
X	- Fração molar particular do componente	mol
XAi	- Vazão de água	kg/h
Xaqfi	- Vazão nominal de água quente da célula-combustível	kg/h
Xaqmi	- Vazão nominal de água quente do motor de combustão interna	kg/h
XDIi	- Vazão de Diesel	kg/h
XGni	- Vazão de Gás Natural	kg/h
XH2i	- Vazão de Hidrogênio	kg/h
Xj	- Fluxo de massa de um determinado ponto da configuração	kg/h
XMti	- Vazão de Metanol	kg/h
Xpelfi	- Potencia nominal da célula-combustível	kW
Xpelmi	- Potencia nominal do motor de combustão interna	kW
XWC	- Potencia elétrica comprada da concessionária	kW
XWV	- Potência elétrica vendida à concessionária	kW
yi	- Variável binária	“-“
$Y_{MCI,FC}$	- Variável binária (motor de combustão interna, célula-combustível)	“-“
$Z_{MCI,FC}$	- Investimento (motor de combustão interna, célula-combustível)	US\$/h

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Motivação da pesquisa.....	20
1.2	Objetivo.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1	Aspectos Tecnológicos	24
2.2	Aspectos Regulatórios.....	34
2.2.1	Uma revisão da questão internacional.....	35
2.2.2	Uma visão da questão brasileira.....	36
2.2.3	Contratação da energia elétrica	36
2.2.4	Políticas de incentivo à cogeração	37
3	METODOLOGIA	43
3.1	Eficiência Exergética.....	44
3.2	Custo exergético.....	45
3.2.1	Teoria do Custo Exergético.....	48
3.3	Modelos de avaliação econômica	50
3.4	Modelos de otimização	50
4	ESTUDO DE CASO.....	52
4.1	Modelagem dos custos exergéticos	58
4.1.1	Proposição 1	58
4.1.2	Proposição 2	59
4.1.3	Proposição 3	60
4.1.4	Proposição 4	61
4.1.5	Proposição 5	62
4.1.6	Custos exergoeconômicos	63
4.2	Análise financeira da superestrutura	65
4.3	Otimização	66
4.3.1	Dado e variáveis	67
4.3.2	Função objetivo	68
4.3.3	Restrições	69
5	RESULTADOS	72
6	DISCUSSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS	77

FUTUROS

7	CONCLUSÃO	81
8	REFERÊNCIAS	83
	ANEXO 1	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação da pesquisa

A poluição e a degradação ambiental são produtos da existência humana e suas atividades produtivas. Desta forma, se observa que a rápida industrialização e urbanização dos países em desenvolvimento têm levado a um aumento severo na poluição: água que está inapta para beber ou banhar-se, altos níveis de concentração de poluentes no ar, aumento da quantidade de resíduos sólidos urbanos e resíduos perigosos dispostos inadequadamente.

Em um relatório de 2007 das Nações Unidas, o "Painel Intercontinental sobre Mudanças Climáticas" salienta diversos indicadores acerca das mudanças climáticas que o planeta vem sofrendo, e recomenda que a sociedade mundial responda a esses problemas com políticas de diminuição dos gases geradores do efeito estufa e matrizes energéticas alternativas capazes de substituir as matrizes atuais (ANDRÉ, 2008).

Em resposta a esses indicadores sobre o aquecimento global e com a perspectiva de uma nova matriz energética que possa suprir ou diminuir a demanda pelas matrizes de combustíveis fósseis, a União Européia, os Estados Unidos, China, Índia, Brasil, dentre outros países, estão implantando políticas que objetivam diminuir a emissão de CO₂ e a dependência em combustíveis fósseis na demanda por geração de energia elétrica, como parte do protocolo de Kyoto, bem como uma resposta global a essas mudanças climáticas.

Tais políticas estão encontrando dificuldades em sua implantação, pois o descaso de alguns governos em colocar em prática aquilo que ficou acordado em Kyoto 1997 leva a pensar que a necessidade econômica apresenta capacidade coercitiva maior do que a questão ambiental. Uma das regras discutidas no Protocolo de Kyoto, que só entrou em vigor em 2005, é a diminuição de 5,2% da emissão de carbono. Em 2011, na 17^a Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP 17), o Protocolo de Kyoto foi reavaliado com o estabelecimento de novas metas até 2015 o substituindo, por um novo protocolo global com novas metas.

Por sua vez, o meio ambiente necessita de políticas capazes de viabilizar alternativas energéticas limpas e menos poluentes comparativamente às que parte significativa dos países utiliza como base para o seu desenvolvimento.

Atualmente, a eficiência global de conversão de energia primária em energia elétrica é de aproximadamente um terço. Em outras palavras, dois terços da energia primária são

dissipados no processo de conversão, principalmente sob a forma de calor a baixas temperaturas (ELETROBRÁS PROCEL, 2001).

Nos próximos 40 anos, a quantidade de energia primária poderá ser reduzida de 25% a 35% nos países industrializados devido a novas tecnologias empregadas nas indústrias e no processo de distribuição de energia com ganhos econômicos significativos. Nos países em desenvolvimento, que se caracterizam por um alto índice de crescimento econômico e também por uma grande presença de equipamentos obsoletos, os potenciais de redução são ainda maiores, entre 30% e 45% (ELETROBRÁS PROCEL, 2001).

Nesse contexto, utilizar a energia com responsabilidade, evitando seu desperdício e buscando alcançar patamares razoáveis de eficiência energética constitui um novo parâmetro a ser considerado no exercício da cidadania. Os instrumentos de combate ao desperdício de energia estão alicerçados na mudança de hábitos dos consumidores, na disponibilidade de alternativas tecnológicas ambiental e economicamente factíveis e na busca pelo aumento da eficiência energética dos equipamentos e processos.

O consumo de edificações residenciais, comerciais e de serviço público chega a 44,7% da matriz elétrica brasileira (INMETRO, 2012). Partindo deste pressuposto, o INMETRO, com o intuito de otimizar o uso dos recursos energéticos em unidades habitacionais autônomas, como casas, apartamentos e suas áreas comuns (corredores, escadas, *playground*) lançou o programa de etiquetagem de edifícios residenciais em meados de novembro de 2011.

Uma questão recentemente discutida em nível mundial trata da descentralização na geração de energia elétrica por pequenos consumidores através da utilização de microcentrais de cogeração de energia. Sistemas descentralizados de geração de energia (incluindo os de cogeração) podem contribuir para a ampliação da capacidade instalada, descongestionando e aumentando a confiabilidade do sistema de transmissão, diversificando a matriz energética e ampliando as oportunidades de negócio para o capital privado no mercado brasileiro.

O Brasil apresenta expressivo potencial para a implantação de pequenas plantas de cogeração, sobretudo no setor terciário, onde se concentra um número considerável de pequenos estabelecimentos comerciais com necessidades de energia elétrica, vapor, água quente e/ou água gelada para refrigeração (CRISTALDO; ORTEGA, 2007).

Neste panorama, torna-se viável a utilização de tecnologias limpas, energias renováveis sem emissão de CO₂ (ou com conteúdo reduzido, os chamados sistemas *near zero emission*), ou gás natural/biogás em microgeração, com maior eficiência em termos de emissões. Apesar de já não ser uma idéia totalmente nova, o sistema de geração distribuída encontrou um

caminho favorável para sua implantação quando baseado em fontes limpas de energia. O estímulo vem da batalha contra as alterações climáticas, da tendência de aumento do preço do petróleo, da necessidade de abastecimento energético com garantias no suprimento e do próprio progresso tecnológico.

Sistemas de geração distribuída são associados à microcentrais eólicas, painéis solares fotovoltaicos e térmicos, microssistemas de geotermia, microcentrais de cogeração e células-combustível. Algumas tecnologias ainda estão em fase experimental, outras são tecnologias maduras e já acessíveis aos pequenos consumidores, em termos de preço de investimento e de mão de obra para torná-las operacionais.

O Brasil encontra-se alinhado às perspectivas mundiais em termos de inclusão de sistemas descentralizados de energia no sistema de geração elétrica do país, ainda que em tempo e ritmo mais lentos que outros países, nos quais tais processos encontram-se mais adiantados. Recentes mudanças legais, como a Resolução Normativa N° 517/2012 da ANEEL sobre microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica, foram estabelecidas para adequar o mercado de energia elétrica para o advento de eventual parcela autoproduzida por edificações, tal como é previsto nos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) do Programa Nacional de Etiquetagem do INMETRO.

Com a efetiva implantação de tais instrumentos, é esperada uma economia entre 30% a 50% da energia consumida. Ações como as que aqui se apresentam vão ao encontro da meta de planejamento energético do país que trata da redução do consumo de energia elétrica de 10% até 2030 (INMETRO, 2012). Ainda para favorecer a adesão ao programa por parte dos potenciais interessados, como um incentivo adicional, estão em fase de estudo melhores condições de financiamento tanto do BNDES quanto da Caixa Econômica Federal para empreendimentos etiquetados (INMETRO, 2012).

1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo principal comprovar a elegibilidade econômica de uma superestrutura, utilizando métodos que permitam avaliar o custo exergoeconômico em busca da substituição das tecnologias consagradas.

Diante dos atuais avanços legais alcançados pelo Brasil, busca-se avaliar possíveis configurações de microcentrais de cogeração (1 kW a 100 kW) de energia aplicada a condomínios residenciais com vistas a motivar o desenvolvimento de análises tecnológicas e

metodológicas. Com o intuito de contribuir para solução do problema da microcogeração estabelecido nas resoluções da ANEEL e RTQ-R do INMETRO, seguem os seguintes critérios:

- Apresentar novas tecnologias possíveis às alternativas de cogeração;
- Demonstrar a aplicabilidade das novas tecnologias através de parâmetros exergéticos de uma superestrutura composta de motores a combustão interna e células-combustível a serem empregadas na qualidade de microcogrador residencial. Uma das configurações proposta conta com motores a combustão interna que prevêm a utilização de gás natural ou óleo diesel. Em uma segunda configuração, utilizam-se células-combustível tipo PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) contando com hidrogênio e metanol. Em ambos os casos, busca-se verificar a viabilidade de implantação de um sistema de cogeração de energia com menor impacto ambiental e economicamente fiável.
- Comparar a atratividade econômica na geração de energia térmica (água quente) e eletromecânica das duas tecnologias através de parâmetros econômicos (retorno financeiro, elegibilidade).
- Fundamentar a metodologia na seleção dos componentes, através de parâmetros devidamente sustentados por uma análise de otimização multitemporal, que submete à competição as tecnologias de geração e reservatórios (térmico e elétrico); tal modelo é empregado para a análise do despacho de cargas para condições típicas diárias de demanda elétrica e de consumo de água quente do condomínio em estudo, relativas aos períodos de inverno e verão, para a obtenção de solução ótima do ponto de vista econômico. O modelo de otimização da síntese de componentes deverá permitir identificar a melhor alternativa em análise.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos Tecnológicos

Com o advento da instalação de sistemas de cogeração em edifícios residenciais e comerciais no Japão na década de 1990, reservatórios térmicos e elétricos (baterias) passaram a ser utilizados em associação com tal tecnologia. Tais reservatórios servem como pulmões para o sistema como um todo, uma vez que a instalação destes equipamentos visa a autossuficiência das edificações. A única maneira encontrada na época era a instalação destes reservatórios, porém com o tempo surgiram dúvidas quanto à sua eficiência e à sua real necessidade.

Para Ito et. al. (1992), antes de se tomar a decisão de se instalar um sistema de estocagem de energia, deve-se verificar:

- ✓ Há realmente a necessidade da instalação de um reservatório térmico?
- ✓ Qual o volume de água quente mais apropriado que se deve armazenar?
- ✓ Quais as vazões de água quente envolvidas no problema?
- ✓ Qual será a política operacional a ser adotada?

Para auxiliar nas respostas, foram desenvolvidos modelos matemáticos que visam estudar a queda dos custos operacionais em uma unidade de cogeração composta por motores diesel e reservatórios de estocagem. O método serve para vários tipos de sistemas de cogeração que utilizam motor de combustão interna a diesel e reservatórios em geral visando o atendimento das demandas de energia elétrica e térmica. O consumo destas energias nem sempre é utilizado na mesma intensidade e em idênticos momentos, ou seja, as características de utilização de cada energia dependem de modo significativo do perfil das necessidades da unidade residencial, bem como da sazonalidade e dos hábitos de seus moradores.

Diante deste cenário, a utilização de um reservatório térmico se revela economicamente vantajosa. Para tanto, há a necessidade da realização de um estudo das flutuações de consumo de água quente com base na sua frequência de utilização, adequando-se assim o volume armazenado de água. Com isso, pode-se eliminar uma possível necessidade da queima suplementar de combustível, otimizando a utilização de combustível.

A análise de utilização da fonte primária de energia é foco de diversos estudos que buscam otimizar a utilização dos recursos naturais para a obtenção de energia; Onovwiona et. al. (2007) propuseram-se a avaliar o movimento do mercado de cogeração para aplicação residencial em Toronto através de um modelo técnico e econômico a partir do uso de motor

de combustão interna, gerando energia térmica e elétrica para uma unidade residencial que prioriza a geração de energia elétrica.

Pelo fato do sistema operar em cogeração, considera-se um melhor uso do combustível pelo aproveitamento de 80% da disponibilidade energética, número bem superior aos 30% praticados pelo mesmo sistema para geração puramente elétrica. Na proposta desses autores, o armazenamento de energias (tanto térmica quanto elétrica) permite que os equipamentos geradores trabalhem somente nas horas de consumo e eventualmente para deixar os reservatórios cheios. Para tanto, há a necessidade de se fazer um estudo de flutuação de consumo de energia, considerando o consumo anual de água quente e energia elétrica na unidade residencial, demonstrando os efeitos da sazonalidade e mais especificamente ao longo das 24 horas de um dia, como pode ser observado na Figura 1, na qual se observa a geração de energia elétrica sendo realizada pelo motor a combustão interna ao longo de seis horas (barras azuis). Esta geração de energia elétrica é destinada ao banco de baterias, desta maneira garantindo o fornecimento de energia elétrica nas horas restantes somente com a sua utilização. Através da Figura 2 observa-se o perfil de geração da água quente, que é realizada nos mesmos instantes que a energia elétrica, porém seu consumo difere, permitindo a utilização do reservatório pontualmente, demonstrado pelas barras roxas, não necessitando de sua geração em todos os momentos.

De posse dos perfis de consumo, podem-se propor níveis diferentes de geração, utilizando diversos tipos de equipamentos. Com base nas Figuras 1 e 2, propõe-se utilizar três motores de diferentes capacidades, um motor de 6 kW, um motor de 3,5 kW e um motor de 2 kW de potência de geração de energia elétrica. Com tais equipamentos, há a possibilidade de se atender a basicamente três cenários: o primeiro com a possibilidade de venda de energia elétrica a concessionária, o outro apenas produzindo energia para autossuficiência e o último comprando energia elétrica da concessionária em horários de pico de consumo. Com a determinação do perfil de consumo, os equipamentos podem ser especificados de tal maneira que permitam a racionalidade da utilização do combustível.

Nos países com invernos rigorosos, condomínios residenciais optam em sua maioria pela utilização de caldeiras a fim de se obter energia térmica, com a compra de energia elétrica provida por uma concessionária. É comum, dessa forma, que muitos trabalhos disponíveis na literatura façam a comparação da utilização da fonte primária de energia (combustível) em novas tecnologias como microcentrais de cogeração. As comparações nestes casos levam em consideração a poluição gerada para obtenção das energias térmicas e elétricas avaliando os ganhos nas perdas naturais de cada sistema (DORER *et al.*, 2009).

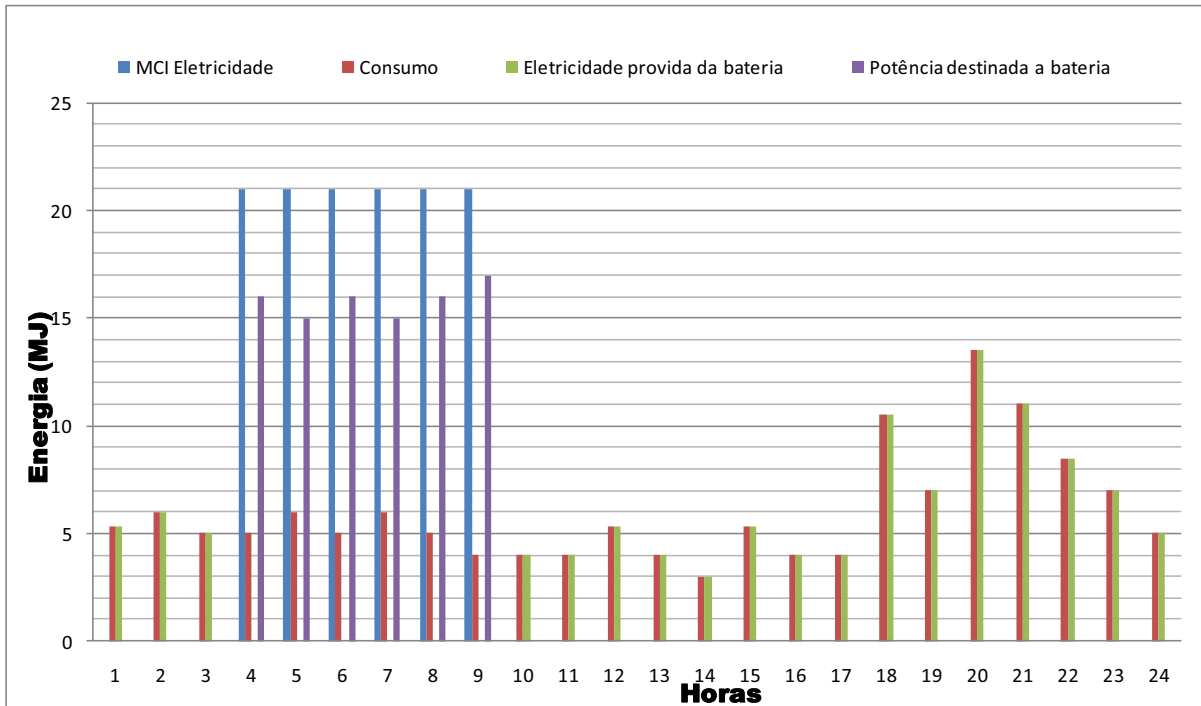


Figura 1 – Flutuação de consumo de energia elétrica (ONOVWIONA et. al., 2007).

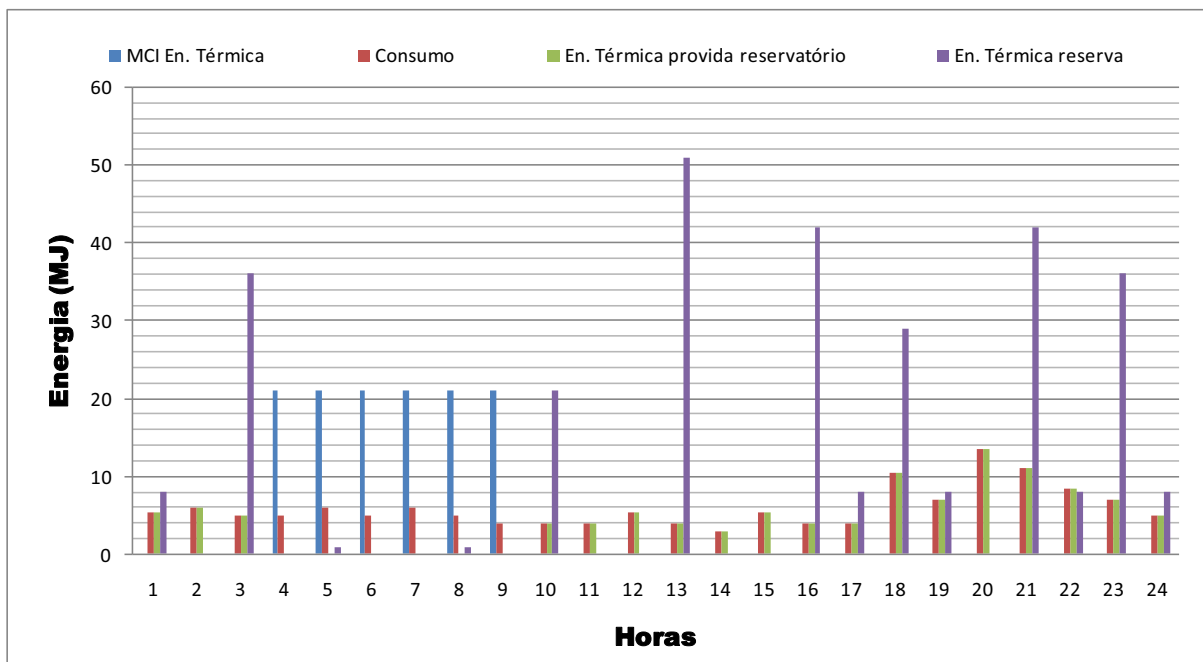


Figura 2 – Flutuação de consumo de água quente (ONOVWIONA et. al., 2007).

Para tal autor, outro ponto a se observar são as emissões de CO_2 que devem ser comparadas a fim de se demonstrar o quanto cada configuração contribuirá ao longo do tempo em aplicações específicas, como em um condomínio multifamiliar ou em residências compostas por uma única família. Tais edificações são testadas em três níveis de demanda, sendo avaliado o consumo de energia elétrica e térmica de cada aplicação. Para os casos

avaliados foi utilizado reservatório de água quente e suas perdas foram comparadas. Uma célula combustível tipo óxido sólido (SOFC, *solid oxid fuel cell*), uma célula combustível tipo PEMFC, um motor Stirling, um motor de combustão interna e o reservatório de água quente foram comparados com um sistema frequentemente utilizado na Suíça por tais tipos de edificação, correspondente a caldeira a gás para produção de água quente e aquisição de energia elétrica da rede local.

Na análise realizada, comparando a geração de CO₂ e o consumo de energia primária inclusas na geração da energia elétrica da rede, as alternativas propostas apresentaram ganhos tanto em emissões de CO₂ quanto em relação à utilização da energia primária (combustível), com destaque ao motor Stirling, que se mostrou o mais eficiente dentre as tecnologias testadas.

Com o correr dos anos, a microgeração de energia vem se tornando uma tecnologia emergente com um grande potencial de eficiência energética e de benefícios ao meio ambiente. Com base no crescimento da utilização desta tecnologia, Accadia et. al. (2003) avaliam diversas opções disponíveis no mercado para estes fins. Basicamente há três tipos de configurações: o consagrado motor de combustão interna, seguido pelas células combustíveis e o motor Stirling.

Uma configuração foi testada por tais autores em uma residência utilizando um sistema de microgeração com motor de combustão interna. Para simular o consumo da residência foram instalados equipamentos domésticos e *fan coils*, determinando assim o consumo elétrico e térmico. A demanda de energia elétrica foi estimada em 10 kW e a demanda térmica foi avaliada em 30 kW.

Muito ainda se depende do desenvolvimento da tecnologia de microgeração; as células-combustível se mostram com um potencial muito grande do ponto de vista tecnológico, porém os custos não são atrativos. Outra questão decorre dos serviços prestados tanto para a manutenção dos equipamentos vendidos quanto da entrega de gás por um preço mais atrativo. A constante geração térmica e elétrica em condomínios residenciais com propostas que utilizam célula-combustível tipo SOFC se dá pelo fato de esta consumir menos energia primária, e por consequência poluir menos o meio ambiente.

Levando em consideração a poluição gerada nos sistemas de cogeração convencionais, Dorer et. al.(2005) apresenta uma configuração de cogeração utilizando-se célula-combustível operando em dois tipos de prédios residenciais. A motivação para a realização do estudo foi a elevada eficiência de produção de energia elétrica através das células-combustível aliada à baixa emissão de gases poluentes e ao baixo ruído gerado.

Definiu-se o consumo de água quente e energia elétrica nas duas configurações traçando um gráfico de consumo ao longo de uma semana. De posse das informações relativas à demanda, foram obtidas as configurações com basicamente três tipos de equipamentos, sendo dois deles células-combustível e no outro caso uma caldeira. Estes equipamentos também foram divididos por potência produzida, também em três níveis.

Uma análise posterior de emissão de gases por parte dos equipamentos foi também realizada, comparando as tecnologias do ponto de vista ambiental. As células-combustível, utilizando gás natural, quando comparadas à caldeira, apresentaram uma vantagem de até 48% relativamente ao aproveitamento da fonte primária, além de serem menos poluentes.

A partir da análise da literatura, observou-se que os estudos de cunho comparativo necessariamente são realizados com pelo menos uma tecnologia emergente e uma tecnologia consagrada a fim de comprovar a viabilidade de implantação e operação de projetos envolvendo o emprego de novas tecnologias.

A fim de demonstrar as necessidades que envolvem um projeto de descentralização de produção de energia e de avaliar os benefícios ambientais na instalação das diversas tecnologias testadas, De Paepe et al. (2006) elaboraram um estudo comparativo cuja proposta foi de se avaliar os custos envolvidos e a emissão de CO₂ entre três microcentrais de cogeração para utilização residencial. Nestas configurações foram testadas dois tipos de motores de combustão interna queimando gás natural, dois motores Stirling e duas células-combustível.

Paepe et al. (2006) comparam cinco concepções de microcentrais de cogeração com capacidade inferior a 5 kW em residências familiares compostas basicamente por dois adultos e duas crianças. O consumo de energia térmica e elétrica das residências foi monitorado, admitindo-se que as microcentrais térmicas deveriam trabalhar em paridade térmica; nesse caso, a energia elétrica excedente era destinada à rede e no caso da falta de energia elétrica a mesma poderia ser comprada da rede.

Os cinco tipos de micro centrais operam com uma diminuição de emissão de CO₂ quando comparadas com a produção de um fornecedor centralizado (barras azuis da Figura 3), sendo que o motor Stirling apresentou maior valor comparativo de economia anual para tal aplicação, conforme se pode observar na Figura 3. Financeiramente, porém, o projeto não se mostrou viável se não houver incentivos governamentais, devido aos elevados investimentos e baixo retorno; as barras vermelhas determinam um cenário hipotético no qual haveria incentivo do governo local.

Outro modo de se viabilizar a implantação de projetos contendo novas tecnologias que não recebem incentivos governamentais é por meio da reparametrização de sistemas, como Beausoleil (2009) propôs em sua pesquisa.

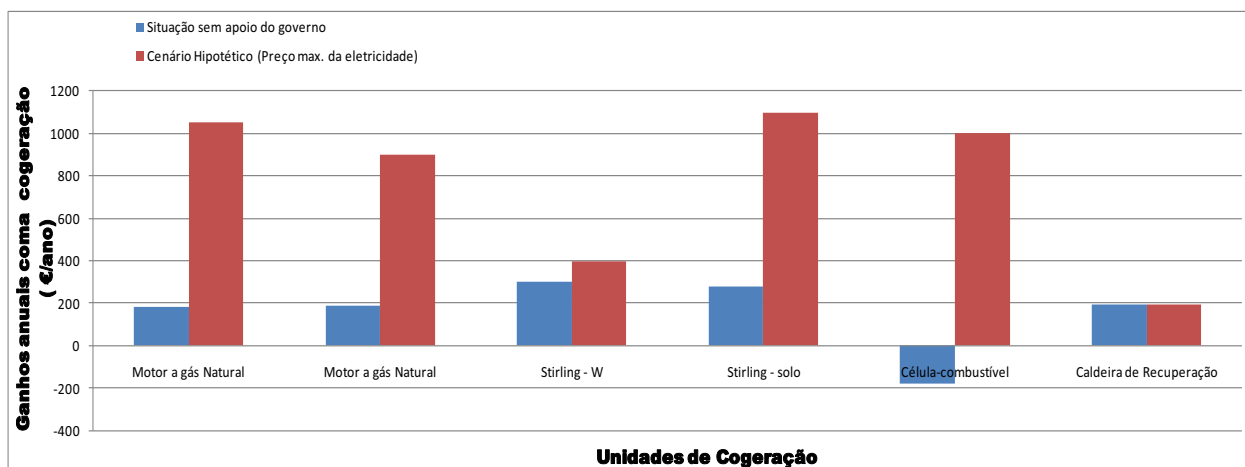


Figura 3 – Comparativo de economia anual para diferentes micro centrais de cogeração (PAEPE et al., 2006).

Um programa experimental foi escolhido para analisar o desempenho do protótipo de 2,8 kW da célula SOFC. O modelo apresentado na Figura 4 é detalhado termodinamicamente passo a passo a fim de se fazer uma calibração neste sistema. A célula-combustível neste sistema torna-se apenas um componente em meio a tantos outros que compõem um sistema complexo; tem-se também neste sistema um combustor para queima suplementar, pré-aquecedor, trocadores de calor, compressores de combustível e de ar, dentre outros.

Para este sistema desenvolveu-se um modelo matemático simulando o desempenho térmico e elétrico de um sistema de microcogeração utilizando uma célula-combustível de 2,8 kW a fim de buscar o ponto ótimo de operação desta configuração. Tais modelos matemáticos remetem a possibilidade de se trabalhar com parâmetros ideais de trabalho para baixar os custos de produção, minimizando a utilização da fonte primária de energia (combustível) e tornando o projeto economicamente viável.

Por meio de estudos de viabilidade econômica são definidos os investimentos a serem realizados, e para tanto há a necessidade de se dispor de múltiplas alternativas. Com base neste raciocínio, Alanne e Saari (2007) consideraram a seleção de um sistema de suprimento de energia para fins residenciais utilizando um sistema de decisão estruturado com múltiplas possibilidades (superestrutura), que envolve análises financeira e ambiental. O estudo em questão visa fazer a comparação termoeconômica e de impactos ambientais de um sistema descentralizado de energia com os sistemas convencionais oferecidos na Finlândia.

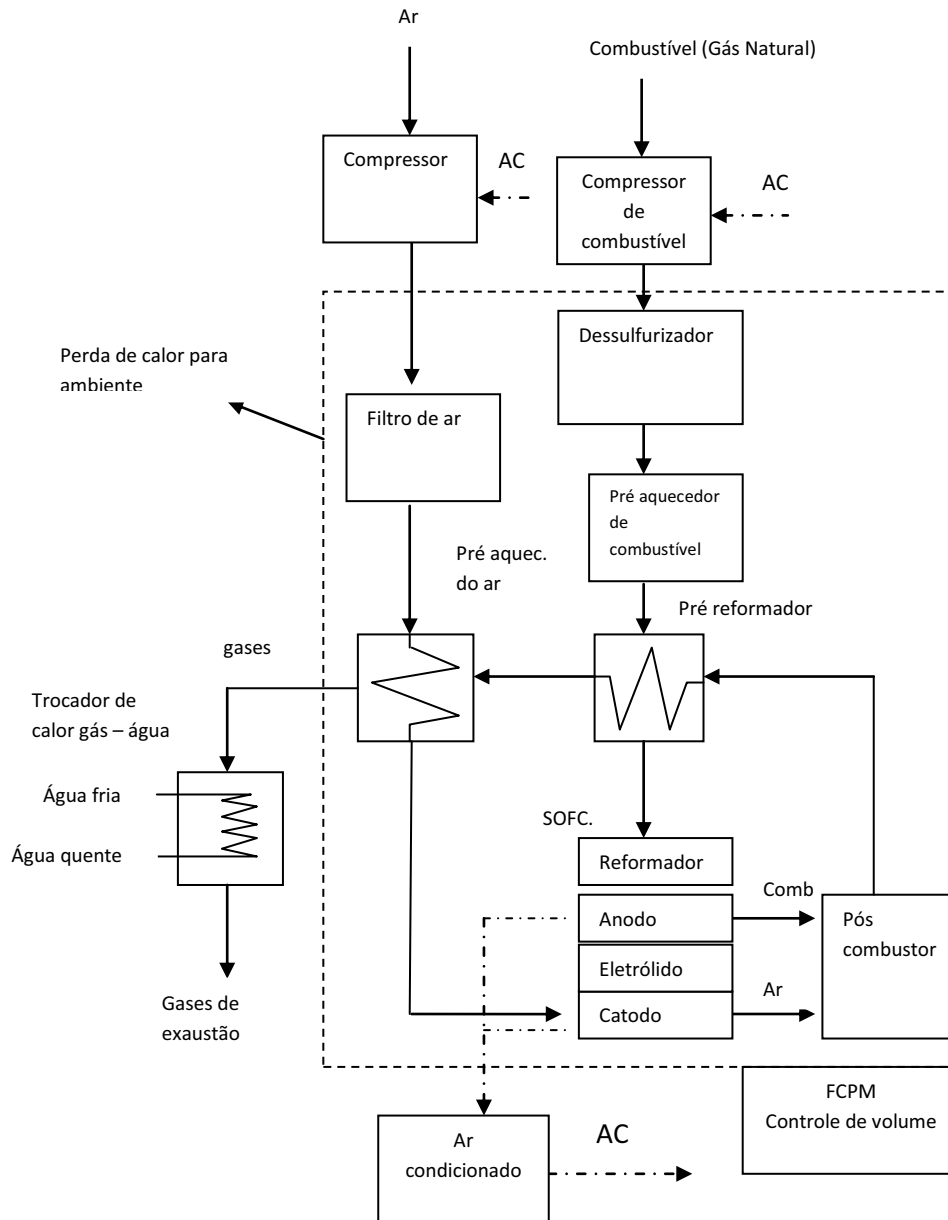


Figura 4 – Configuração utilizando a célula-combustível de 2,8 kW (SOFC) (BEAUSOLEIL, 2009).

Por se tratar de uma análise de otimização com múltiplas possibilidades, todas elas devem ser valorizadas obedecendo a limites que variam entre um valor máximo e um valor mínimo; itens como o uso da energia, taxa real de juros, preço dos insumos, preço dos produtos já fornecidos, taxas de emissão de poluentes, tempo de vida útil dos equipamentos, custos de operação e manutenção dos equipamentos são calculados. A função objetivo do modelo visa maximizar os produtos finais (energia elétrica e térmica) e minimizar os custos com utilização dos insumos, emissões de poluentes e custos relacionados com a vida útil da instalação.

As tecnologias são testadas no modelo através dos valores atribuídos a elas, e para cada tipo de central térmica há um conjunto que mais se torna viável a compor a configuração final. Torna-se possível evidenciar que o sistema de microgeração de energia é viável economicamente, contribuindo com uma melhor utilização da fonte de energia primária.

O estudo realizado por Lozano et. al.(2009) apresenta um modelo de otimização de uma unidade de cogeração a fim de se obter o ponto ótimo de trabalho, entregando energia elétrica e térmica (aquecimento e climatização) para edifícios do setor terciário. De acordo com os resultados do trabalho, os sistemas de trieração de energia apresentam vantagens econômicas, ambientais e energéticas que devem ser cada vez mais exploradas.

Primeiramente levantou-se o perfil de consumo de um prédio, no caso um hospital com 500 leitos, que demanda água quente, vapor em um dado nível de pressão, refrigeração para climatização ambiente e energia elétrica que deverá ser entregue 24 horas por dia ao longo de todo ano. A superestrutura definida é demonstrada através da Figura 5, na qual CG representa gás natural, VA representa vapor saturado a 180°C, WH representa água quente a 90°C, WR representa água resfriada a 5 °C, AA representa ar ambiente, WC representa água gelada a 5°C e EE representa eletricidade.

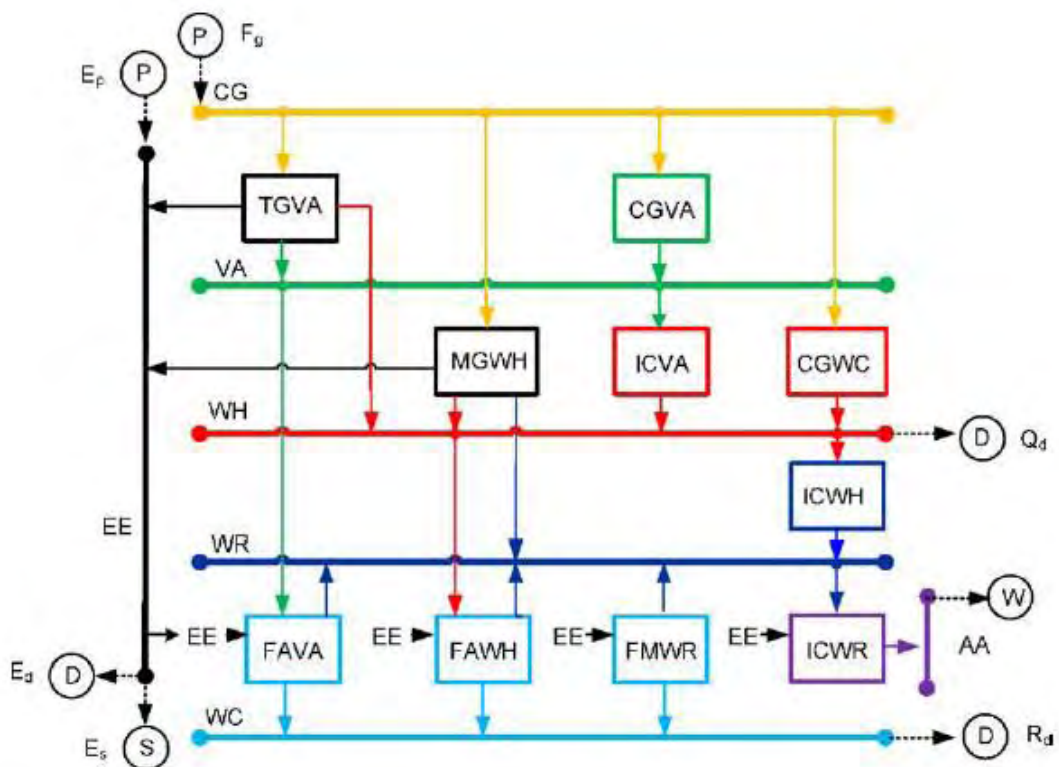


Figura 5 – Superestrutura de suprimento de energia (LOZANO et al.,2009).

O sistema de suprimento de energia (superestrutura) satisfaz as demandas térmicas e elétricas da edificação, sendo elas Q_d (aquecimento), R_d (resfriamento) e E_d (energia), consumindo gás natural F_g e entrega de potência elétrica E_p . A possibilidade de venda de excedente de energia elétrica é representada pela variável E_s . A configuração conta com turbina a gás + caldeira de recuperação, produzindo vapor e água quente (TGVA), caldeira para produção de vapor (CGVA), motor a gás + água quente do sistema de recuperação de calor (MGWH), trocador de calor vapor/água quente (ICVA), caldeira produtora de água quente (CGWH), trocador de calor água quente/água gelada (ICWH), sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito, acionado por vapor (FAVA), sistema de refrigeração por absorção de simples efeito, acionado por água quente (FAWH), sistema de refrigeração por compressão (FMWR), e torre de resfriamento (ICWR).

Identificam-se, dessa forma, todos os dados técnicos dos equipamentos e os custos envolvidos com insumos, operação e manutenção levando em consideração a vida útil dos equipamentos. Cálculos de eficiência de equipamentos também são analisados e compõem o modelo de otimização, desenvolvido utilizando programação linear (MILP) com a utilização do software Lingo 10.0. O objetivo da otimização é buscar o ótimo ponto de trabalho buscando reduzir os custos anuais de operação da central térmica de cogeração, maximizando a entrega dos produtos.

A superestrutura foi dimensionada com base na demanda do hospital, assim como seus equipamentos e suas demandas. Os cálculos permitiram realizar um ganho de 90% no custo da energia anual com um tempo de retorno inferior a três anos, revelando que a otimização em busca da escolha do equipamento mais adequado e da melhor estratégia de funcionamento são fundamentais para permitir ganhos do ponto de vista técnico e econômico.

Outro estudo realizado por Lozano e Saraiva (2010) identifica as necessidades requeridas de energia por condomínios residenciais e comerciais seguindo tendências anuais, sazonais e diárias de acordo com as variações de consumo. Para isso, há necessidade da implantação de um modelo de programação linear-inteiro misto (MILP, *mixed integer programming*), selecionando a melhor configuração de um sistema de fornecimento de energia a para edifícios residências e comerciais levando em consideração a flutuação de consumo sazonal e diária. Para tanto, avaliam-se três situações, sendo a primeira trabalhar com uma redução da utilização da energia primária na ordem de 30 a 60%, a segunda trabalhar com o gás natural como fonte primária de energia em novas tecnologias de equipamentos, e a terceira prevê a instalação de sistema de refrigeração a fim de diminuir o consumo de energia elétrica destinada a tais fins.

O modelo de minimização de custos e maximização de produção de energia, a partir do modelo MILP, permite a seleção dos equipamentos que deverão compor a configuração de acordo com a necessidade de cada projeto. O modelo foi estruturado para minimizar os custos anuais de produção, utilizando restrições técnicas, econômicas e legais. Este sistema permite saber qual a melhor configuração de acordo com a necessidade da unidade consumidora, selecionando equipamentos que fazem parte da superestrutura.

Ruan et al. (2009) avaliaram turbinas a gás, motores a gás, motores diesel e células-combustível de ácido fosfórico (PAFC, *phosphoric acid fuel cell*) em quatro edificações típicas de segmentos do setor terciário (um hotel, um hospital, edificação de escritórios e um centro comercial) considerando diferentes cenários. Os autores constataram que, para as condições analisadas, a seleção tecnológica para o hotel teve a turbina a gás em primeiro lugar (seguido de motor a gás, motor diesel e célula-combustível), para o hospital recomendou-se a célula-combustível (seguido de motor a gás, turbina a gás e motor diesel), para o centro comercial a célula-combustível (seguida de motor diesel, motor a gás e turbina a gás) e para os escritórios o motor diesel (seguido de célula-combustível, motor a gás e turbina a gás).

A análise desenvolvida por Ren e Gao (2010) avalia de forma comparativa, para a estrutura tarifária do Japão, motores a gás e células-combustível para edificações residenciais considerando aquecimento e resfriamento de ambientes, bem como a geração de eletricidade. O modelo de programação linear multitemporal envolve a análise de operação, considerando cargas típicas de inverno e verão, tendo como resultado a seleção de célula-combustível para a condição de mínimo custo e mínima emissão.

Embora a presente revisão tenha se concentrado especificamente em ciclos térmicos de cogeração para suprimento das demandas do setor terciário, em termos mundiais observa-se uma maior preponderância das análises de geração distribuída focadas no aproveitamento solar fotovoltaico. Nottrott et al. (2013), por exemplo, utiliza um modelo de programação linear para o despacho ótimo de um sistema que integra painéis fotovoltaicos e sistema de baterias que podem, em conjunto, atender às demandas do consumidor (no caso em análise, uma edificação da Universidade da Califórnia no campus de San Diego) e/ou a venda à rede da concessionária.

2.2 Aspectos Regulatórios

O mercado consumidor de energia em nível residencial é crescente, face às tecnologias (geralmente eletromovidas) que são incorporadas ao cotidiano das pessoas. A geração distribuída tem sido considerada uma alternativa importante a ser contemplada na matriz energética dos países, em especial quando fontes renováveis de energia são utilizadas, e nesse sentido a geração solar fotovoltaica vem ocupando um papel significativo por sua natureza distribuída e por poder ser instalada facilmente em sistemas modulares.

2.2.1 Uma visão da questão internacional

Alguns países encontram-se na vanguarda desse movimento, e dentre eles Alemanha, Espanha e o Japão apresentam experiências que podem representar avanços significativos para o estabelecimento de políticas públicas voltadas à questão da geração distribuída no Brasil; deste modo, são apresentadas, na sequência, aspectos diversos relatados na literatura.

Em Portugal, o Decreto Lei N° 363, de 2 de novembro de 2007, prevê que a eletricidade gerada em sistemas de microgeração de eletricidade se destine predominantemente a consumo próprio, sendo o excedente passível de ser entregue a terceiros ou à rede pública, com o limite de 150 kW de potência no caso da entrega ser efetuada à rede pública (PORTUGAL, 2007). A referida legislação foi instituída, no corpo do marco legal já existente naquele país, visando simplificar o regimento de licenciamento até então existente, bem como simplificar o relacionamento comercial entre os envolvidos. Pela nova estrutura legal foram estabelecidos dois regimes de remuneração, um geral para a generalidade das instalações e um bonificado, aplicável apenas às fontes renováveis de energia e que incentiva a produção de água quente por aquecimento solar.

No caso da Espanha, Ruiz-Romero et al. (2013) comentam o Real Decreto 1699, de 18 de novembro de 2011, que estabelece aspectos para regulamentação da conexão em rede de produtores de energia elétrica de pequena potência. Pelo fato das instalações com potência de geração inferior a 100 kW e que utilizem fonte solar, eólica, geotérmica e resíduos estarem excluídas da necessidade de autorização administrativa prévia, observa-se uma redução de taxas de acesso e bônus ou prêmios para determinadas situações. De igual modo ocorre com o caso da energia eólica, em que um valor de 0,30 euro/kWh pode ser assumido para aumentar a taxa de retorno do investimento.

Na Alemanha, o governo federal decidiu que em 2050 o país deve contar com 80% de sua eletricidade oriunda de fontes renováveis e, na primeira metade de 2012, o país já alcançava 25% (RICHTER, 2013). Todo cidadão alemão pode se tornar autoprodutor de energia e se integrar à rede de energia alemã, recebendo uma remuneração que leva em conta a tecnologia empregada, o ano da adesão ao sistema (quem entra antes tem maior remuneração que o que entra mais tarde), a potência gerada na autoprodução (quanto menor a potência, maior a remuneração de modo a incentivar a geração distribuída) (ALEMANHA, 2007). O marco legal que regula as tarifas elétricas de autoprodutores (“Erneuerbare Energien Gesetz”, lei de energias renováveis) estabeleceu que a remuneração para esta forma de geração distribuída se desse exclusivamente através de um sistema de tarifa (denominada *feed-in tariff*) associada a contratos de longo prazo e baseada no custo marginal de geração de cada tecnologia.

O Japão é um país que enfrenta dificuldades de suprimento energético, e após o acidente nuclear recentemente ocorrido em Fukushima após um tsunami, maior pressão para um suprimento renovável tem sido observado. Entretanto, desde a década de 1990 há desenvolvimentos para que o mercado de microgeração seja implantado no Japão (TAKAHIRO, 2009) em competição com as concessionárias elétricas, e isso se observa através da redução anual na conta de energia elétrica somada à expansão das vendas de gás natural. É no mercado japonês que se observa, também, forte desenvolvimento de células-combustível para uso doméstico.

2.2.2 Uma visão da questão brasileira

Basicamente existem dois segmentos no mercado de energia no Brasil, sendo que ambos seguem o ambiente regulado e o ambiente livre:

- Geração, transmissão e distribuição;
- Comercialização.

No ambiente regulado pelo governo (monopólio natural¹), empresas de distribuição compram energia para consumidores cativos por meio de leilões públicos regulados pela

¹ O monopólio natural é estabelecido quando uma única empresa pode produzir a um menor custo caso houvesse muitas concorrentes no mercado. De acordo com MATSUDO (2001), o monopólio natural é formado na ocorrência das seguintes características: a) ser intensivo em capital; b) ter produto não estocável com a variação do consumo; c) ter especificidade locacional geradora de renda; d) ser importante para a sociedade; e) ter ligação direta como os usuários.

ANEEL, e operacionalizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Nesse ambiente estão inseridos os segmentos da transmissão e da distribuição (BARJA, 2006).

No ambiente livre é possível que os consumidores possam escolher seu fornecedor de energia, negociando livremente um conjunto de variáveis como prazo contratual, preços, variação do preço ao longo do tempo e serviços associados à comercialização. (BARJA, 2006).

O consumidor assume responsabilidades em relação aos preços da energia quando participa do mercado livre, sendo atendido individualmente, porém esta modalidade não é possível no mercado cativo² (ABRACEEL, 2013). Neste caso os condomínios residências não podem participar por estarem a uma faixa de consumo inferior a 3.000 kW (BRASIL, 1998).

2.2.3 Contratação da energia elétrica

Os consumidores de energia elétrica são cobrados, por meio da conta recebida de sua empresa distribuidora de energia elétrica, em um valor correspondente à quantidade de energia elétrica consumida no mês anterior, estabelecida em quilowatt-hora (kWh) e multiplicada por um valor unitário, que é medido em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh) (ANEEL, 2005).

Cabe à ANEEL estabelecer as tarifas ao consumidor de acordo com suas posses, atribuindo assim o pagamento de um valor justo, como também garantir o equilíbrio econômico-financeiro da concessionária de distribuição (ANEEL, 2005).

As tarifas do “grupo B” se destinam às unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kV e são estabelecidas da seguinte maneira:

- B1 - Residencial baixa renda;
- B2 - Classe rural;
- B3 - Industrial e comercial;
- B4 - Classe iluminação pública.

As tarifas do “grupo B” são estabelecidas somente para o consumo de energia, em R\$/MWh. (ANEEL, 2005).

² Para o consumidor cativo, o distribuidor é o fornecedor, com tarifa regulada. O preço é o resultante de um mix de contratos de longo prazo (ABRACEEL, 2013).

2.2.4 Políticas de incentivo à cogeração

Em 2006, em substituição a resolução N° 21, a ANEEL instituiu a resolução N° 235, de 14 de novembro de 2006, que estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogedoras de energias.

A Resolução n° 235 considera a necessidade de implantar políticas de incentivo ao uso racional dos recursos energéticos do país, uma vez que a atividade de cogeração de energia elétrica contribui com a racionalidade energética, possibilitando um melhor aproveitamento dos combustíveis, apresentando menor consumo total quando comparada à geração individual de calor e energia elétrica, e gerando conseqüentes benefícios para sociedade.

Para tanto, tem-se que atender os requisitos mínimos de racionalidade energética, mediante o cumprimento das equações (1) e (2).

$$\frac{E_t}{E_f} \geq 15\% \quad \text{ou} \quad E_t \geq 0,15 E_f \quad (1)$$

$$\left(\frac{E_t}{E_f} \right) / X + \frac{E_e}{E_f} \geq Fc\% \quad (2)$$

Os valores de X e Fc referidos na fórmula serão aplicados em função da potência elétrica instalada na central de cogeração e do combustível principal, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Fatores de cogeração e ponderação (ANEEL, 2012).

Fonte/potência elétrica instalada	X	Fc%
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Ainda como forma de incentivo, o INMETRO lançou em 2011 o programa de etiquetagem de edificações cujo objetivo é estabelecer os critérios para o Programa de

Avaliação da Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.

De acordo com INMETRO (2012), o processo de etiquetagem de edifícios é composto de duas etapas, sendo a primeira delas correspondente à avaliação do projeto do edifício e devendo ser realizada por organismo acreditado/designado pelo INMETRO com base nos projetos e nas especificações técnicas enviadas pelo proprietário. O nível de eficiência do edifício é calculado nesta etapa e é também expedida a Etiqueta de Projeto em um período de 15 a 60 dias, a depender da complexidade do projeto e da demanda interna.

A segunda etapa do processo de etiquetagem é a inspeção do edifício construído, que deve ser solicitada pelo proprietário a um organismo designado/acreditado (como o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, da Universidade de Santa Catarina, LABEEE), após a obtenção do alvará de conclusão da obra.

De acordo com INMETRO (2012), a classificação de edifícios por meio da determinação da eficiência energética é realizada em três níveis – envoltória, iluminação e condicionamento de ar – que são reunidos em uma equação geral (3), que pondera cada um desses elementos, com pesos de 30%, 30% e 40%, respectivamente. Nessa equação geral está também relacionada uma parcela de bonificações ou bônus de pontuação (cujo valor varia de zero a um) a ser somado às demais parcelas com peso 1. Tais elementos não são obrigatórios de constarem no edifício, mas podem representar a alteração da classificação do edifício em até uma faixa – há cinco níveis de eficiência, sendo eles A (mais eficiente), B, C, D e E (menos eficiente).

$$PT = 0,30.\left\{\left(EqNumEnv.\frac{AC}{AU}\right)+\left(\frac{APT}{AU}.5+\frac{ANC}{AU}.EqNumV\right)\right\}+0,30.(EqNumDPI)+$$

$$0,40.\left\{\left(EqNumCA.\frac{AC}{AU}\right)+\left(\frac{APT}{AU}.5+\frac{ANC}{AU}.EqNumV\right)\right\}+b_0^1 \quad (3)$$

sendo,

- EqNumEnv - Equivalente numérico da envoltória;
- EqNumDPI - Equivalente numérico do sistema de iluminação, identificado pela sigla DPI, de Densidade de Potencia de Iluminação;
- EqNumCA - Equivalente numérico do sistema de condicionamento de ar;
- EqNumV - Equivalente numérico de ambientes não condicionados e/ou ventilados naturalmente;
- APT - Área de piso dos ambientes de permanência transitória, desde que não condicionados;

ANC	-	Área de piso dos ambientes não condicionados de permanência prolongada, com comprovação de percentual de horas ocupadas de conforto por ventilação natural (POC) através do método da simulação;
AC	-	Área de piso dos ambientes condicionados;
AU	-	Área útil;
b	-	Pontuação obtida pelas bonificações, que varia de zero a 1.

As bonificações da norma de eficiência energética de edificações apenas são consideradas se forem comprovados um dos quatro itens que seguem (BRASIL, 2012):

- Sistemas e equipamentos que racionalizem o uso da água, proporcionando uma economia de 20% do consumo anual de água: estão incluídas torneiras com arejadores, sanitários com sensores ou com válvula de descarga com duplo acionamento, sistemas de aproveitamento de água pluvial, redução de perdas por condensação da água de torres de arrefecimento, reuso de água, dentre outras soluções;
- Sistemas ou fontes renováveis de energia:
 - aquecimento de água, com atendimento igual ou superior a 60% da demanda de água quente: válido para edifícios que possuam demanda de água quente, como restaurantes, hotéis, motéis, hospitais, clínicas, clubes, academias, dentre outros; não é válido para edifícios de escritórios, supermercados, salvo casos especiais em que esta demanda seja significativa;
 - energia eólica ou painéis fotovoltaicos, com uma economia mínima de 10% do consumo anual;
- Cogeração, gerando uma economia mínima de 30% no consumo anual de energia elétrica do edifício;
- Inovações técnicas ou sistemas que aumentam a eficiência, proporcionando uma economia de 30% no consumo anual de energia elétrica: este item abrange qualquer tipo de inovação em eficiência energética que seja lançada no mercado ou soluções que não estejam previstas. Sistemas de aproveitamento da luz natural ou estratégias bioclimáticas que reduzam ou eliminem o uso do sistema de condicionamento de ar, já são previstos no texto e devem ser explorados no item de simulação, salvo haja alguma forma de comprovar uma economia anual no consumo de energia elétrica de 30% através de memória de cálculo ou medição.

Observa-se, então, que a partir da abertura da inclusão da cogeração como possibilidade de bonificação para o processo de etiquetagem de eficiência energética para edificações, o INMETRO transferiu ao setor elétrico a definição das regras para a comercialização da energia autoproduzida.

Em 2012, a ANEEL estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição e compensação de energia elétrica através da resolução normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012, posteriormente alterada pela resolução normativa N° 517, de 11 de dezembro de 2012. A Nota Técnica N° 0177/2012-SRD/ANEEL, de 6 de dezembro de 2012, resgata toda a evolução desse processo, desde a abertura da Audiência Pública N° 42/2011 para o recebimento de contribuições para a formatação da resolução N° 482/2012 até a atual regulamentação, e esclarece que as alterações que levaram à resolução N° 517 limitam-se a aprimoramentos textuais que visam aclarar o entendimento acerca do sistema de compensação financeira da energia elétrica, a consideração das perdas na transformação para unidades consumidoras faturadas em alta tensão com medição na baixa tensão e adequação de responsabilidades sobre especificação, compra e instalação do sistema de medição bidirecional (ANEEL, 2012b).

A resolução N° 482/2012 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração distribuídas aos sistemas de distribuição e compensação de energia elétrica³. Portanto, uma central de microgeração é considerada como tal quando sua potência instalada for de 1 kW a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada⁴, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Para o acesso ao sistema de distribuição, as distribuidoras devem adequar seus sistemas comerciais e elaborar ou revisar normas técnicas para tratar do acesso de microgeração, utilizando como referência os Procedimentos de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, as normas técnicas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais.

Quanto ao sistema de compensação de energia elétrica, a Resolução normativa 482/2012 estabelece:

³ Sistema de compensação de energia elétrica é o sistema pelo qual a energia ativa gerada por unidade consumidora com microgeração distribuída compense o consumo de energia elétrica ativa.

⁴ Cogeração qualificada é um atributo concedido a cogeneradores que atendem os requisitos definidos nesta Resolução, segundo aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo à cogeração.

I- O consumidor poderá aderir ao sistema de compensação de energia elétrica, neste caso deverá ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B. O consumo a ser faturado, referente à energia elétrica ativa, é a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto horário, quando for o caso, devendo a distribuidora utilizar o excedente que não tenha sido compensado no ciclo de faturamento corrente para abater o consumo medido em meses subseqüentes.

II- Caso a energia ativa injetada em um determinado posto horário seja superior a energia ativa consumida, a diferença deverá ser utilizada, preferencialmente, para a compensação em outros postos horários dentro do mesmo ciclo de faturamento, devendo, ainda, ser observada a relação entre os valores das tarifas de energia, se houver.

III- Os montantes de energia ativa injetada que não tenham sido compensados na própria unidade consumidora poderão ser utilizados para compensar o consumo de outras unidades previamente cadastradas para este fim e atendidas pela mesma distribuidora, cujo titular seja o mesmo da unidade com sistema de compensação de energia elétrica, ou cujas, unidades consumidoras forem reunidas por comunhão de interesses de fato de direito.

Através das novas resoluções normativas 235/2006 e 517/2012 da ANEEL e dos programas de etiquetagem do INMETRO, o Brasil entra em uma nova etapa, incentivando o desenvolvimento da descentralização na geração de energia elétrica e tornando cada vez mais viável a utilização das centrais de microgeração em edifícios residenciais.

A presente pesquisa busca estabelecer e solucionar o problema da microgeração destinada a um condomínio residencial situado na cidade de Bragança Paulista - SP, demonstrando hipóteses formuladas da melhor tecnologia a ser utilizada. Trata-se de uma análise com base comparativa entre a instalação de uma planta de microgeração utilizando como elemento gerador o motor a combustão interna ou uma célula-combustível. Neste caso, exige-se a contribuição suficientemente fundamentada dos estudos dos métodos de obtenção dos custos exergoeconômicos, coma utilização da Teoria do Custo Exergético como principal método aplicado em uma superestrutura.

A superestrutura conta com reservatório de água quente e banco de baterias para o armazenamento das energias térmica e elétrica geradas. Tais reservatórios operam de forma a minimizar a utilização dos equipamentos geradores e o consumo da fonte primária de energia, suprimindo as necessidades de consumo diárias do condomínio.

Os modelos de avaliação econômica são empregados após a definição da superestrutura com o objetivo da tomada de decisão entre investir ou não no empreendimento. A viabilidade

econômica é comprovada com métodos tradicionais, como a Taxa Interna de Retorno, Valor Presente Líquido e Tempo de Retorno, que são previstos de serem empregados quando da aplicação das resoluções normativas da ANEEL.

Os resultados obtidos com a análise exergoeconômica aliados aos resultados obtidos com a aplicação dos métodos financeiros servem de base para a matriz de cálculo de otimização que selecionará apenas um equipamento para compor a superestrutura que será responsável pela geração de energia neste condomínio.

Os procedimentos de otimização se constituem de formulações que conduzem à solução de um problema físico qualquer a valores extremos – máximos ou mínimos, de acordo com os objetivos perseguidos – de uma maneira rápida, segura e coerente.

3 METODOLOGIA

A estruturação de modelos para auxílio à síntese e projeto de centrais térmicas, assim como de modelos para a avaliação econômica das configurações propostas e para cômputo dos custos dos produtos finais a serem entregues ao consumidor ou ao mercado são objeto de atenção deste trabalho, com aplicação para as microcentrais de cogeração empregadas em edificações.

Neste capítulo são apresentados os conceitos relativos à análise energética e exergetica, bem como os conceitos relativos à programação matemática para otimização de sistemas energéticos e aos modelos de custo que se constituirão nas ferramentas empregadas na avaliação do sistema de cogeração objeto desta tese.

O primeiro conceito utilizado no estudo de caso refere-se à aplicação de análise energética e exergetica. Tais conceitos termodinâmicos permeiam a base de cálculo da superestrutura estudada. A análise exergetica consiste na quantificação das irreversibilidades do sistema com aplicação das exergias de entrada (insumos) e de saída (produto).

Com a base exergetica fundamentada, é necessário aplicar a Teoria do Custo Exergetico em busca dos custos exergeticos dos fluxos presentes na estrutura em análise. De acordo com Bejan et al.(1996), a contabilidade de custos em uma empresa está relacionada à determinação do valor real dos custos de produtos e serviços, ao estabelecimento de uma base racional para a definição dos preços.

A definição de uma forma de alocação e controle dos gastos e a provisão de informações para avaliação e tomada de decisões passam necessariamente por uma análise de viabilidade econômico-financeira. Para isso, empregam-se algumas das técnicas tradicionais da Engenharia Econômica, a saber: o valor presente líquido, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno do investimento. Recomenda-se que sempre sejam verificados os valores de ao menos duas das técnicas, sendo que as duas primeiras são aquelas mais frequentemente empregadas.

A solução de um problema que envolva sistemas termoeconômicos necessita de um apuramento nas técnicas de tomada de decisão. Métodos de otimização são empregados para se obter a melhor solução final, sistematizando a busca dessa solução de uma maneira mais racional. No estudo de caso há a necessidade da escolha do equipamento que mais se adequar aos despachos de cargas multitemporais presentes no condomínio residencial, minimizando os custos envolvidos no projeto de instalação de uma planta geradora de energia.

3.1 Eficiência exergetica

O emprego da eficiência exergetica (de 2ª Lei da Termodinâmica) para análise de correntes e componentes está diretamente relacionado ao emprego da exergia, com fator de ponderação, pelo que se desprende que correspondam a índices qualitativos.

A exergia⁵ é definida como “o máximo trabalho reversível que se obtém entre um sistema e o ambiente quando interagem para alcançar o equilíbrio” (KOTAS, 1995), ou seja, $B = W_{rev}$. Dessa forma, para o VC da Figura 6, obtém-se a formulação geral da exergia, descritas pelas equações (4) e (5), que apresentam, respectivamente, a definição de exergia total e específica.



Figura 6 – Volume de controle

$$\int_0^1 T_0 ds - b_0^1 = e_s - e_e = h_0 - h_1 + \frac{V_0^2 - V_1^2}{2} + g(Z_0 - Z_1) \quad (4)$$

$$b_0^1 = h_1 - h_0 + \frac{V_1^2 - V_0^2}{2} + g(Z_1 - Z_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad (5)$$

Para o mesmo processo em regime permanente, em termos de vazão de massa, tem-se definida a exergia física, descrita na equação (6).

$$\dot{B}^F|_0^1 = \dot{m} \left[h_1 - h_0 + \frac{V_1^2 - V_0^2}{2} + g(Z_1 - Z_0) - T_0(s_1 - s_0) \right] \quad (6)$$

Desprezando-se tanto a parcela cinética quanto a parcela potencial, chega-se à definição de exergia física da equação (7).

$$\dot{B}^F|_0^1 = \dot{m} [(h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0)] \quad (7)$$

⁵ Adota-se neste texto a letra B para indicar exergia; alguns autores empregam a letra A ou Ex.

A exergia associada à potência mecânica ou elétrica gerada por um sistema térmico é a própria potência e a exergia associada aos combustíveis é um valor próximo ao de sua energia química, adequada por um fator de correção (φ) associado ao poder calorífico inferior (PCI) e que varia para cada tipo de combustível, mas que se encontra próximo da unidade como segue na equação (8).

$$\varphi = \frac{B^Q}{\text{PCI}} \quad (8)$$

As eficiências, como tradicionalmente são tratadas (eficiências mecânicas, térmica), não se baseiam na 2ª Lei da Termodinâmica; desenvolvimentos recentes da análise exérgica permitem a definição de novos critérios de desempenho, que oferecem vantagens sobre os critérios tradicionais.

O cálculo da eficiência exérgica ou racional (ψ), relaciona a exergia dos produtos (ou das saídas do volume de controle considerado) com a exergia dos insumos (ou das entradas no volume de controle) para cada equipamento (KOTAS, 1985), tal como apresentado na equação (9).

$$\psi = \frac{\sum B_s}{\sum B_e} \quad (9)$$

3.2 Custo exérgico

De acordo com Bejan et al.(1996), a contabilidade de custos em um empreendimento está relacionada à determinação do valor real dos custos de produtos e serviços, ao estabelecimento de uma base racional para a definição dos preços dos mesmos produtos e serviços, à definição de uma forma de alocação e controle dos gastos e à provisão de informações para avaliação e tomada de decisões.

Alguns autores, como Cerqueira e Nebra (1999) e Temir e Bilge (2004), afirmam que a regra de alocação dos custos entre as diferentes formas de energia geradas num sistema de cogeração é arbitrária; supondo-se conhecidos os custos marginais referentes à produção das energias elétrica e térmica, conforme a Figura 7, uma reta com coeficiente angular negativo pode ser obtida se forem tomados os pontos A e B, correspondentes respectivamente ao custo marginal puramente elétrico (CC_A/E) e custo marginal puramente térmico (CC_B/Q), a qual

permite diferentes alternativas de partição dos custos da geração combinada de energias térmica e elétrica.

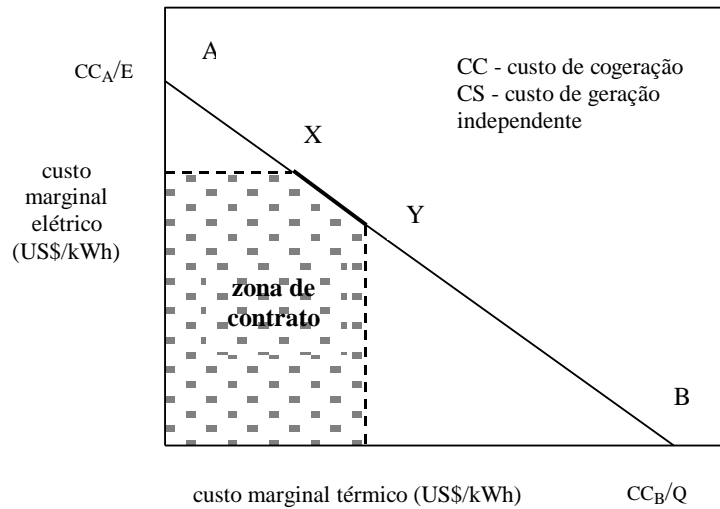


Figura 7 – Curva de “trade-off” para custos elétrico e térmico em centrais de cogeração (BALESTIERI, 2001).

Ponderar a faixa razoável de valores depende de uma série de fatores e interesses localizados; assim, por exemplo, uma empresa pode preferir penalizar mais fortemente o custo marginal térmico para favorecer a comercialização dos recursos elétricos, ou vice-versa. Isso é feito com base no balanço de custos, formulado para um sistema geral operando em regime permanente como segue na equação (10).

$$\dot{C}_{P,\text{total}} = \dot{C}_{F,\text{total}} + \dot{Z}_{I,\text{total}} + \dot{Z}_{OM,\text{total}} \quad (10)$$

sendo P os produtos, F os insumos (*fuel*), I os custos de investimentos e OM os custos de operação e manutenção envolvidos na concepção de um certo sistema energético e \dot{Z} é o custo de investimento dos componentes .

Como a exergia mede o valor termodinâmico real de seus efeitos e os custos somente podem ser associados às *commodities* de valor, seu emprego é mais correto como base de custos; sejam as expressões de custo exergético que seguem:

$$\dot{C}_s = c_s B_s = c_s (\dot{m}_s b_s) \quad - \quad \text{custo exergético nas saídas do VC}$$

$$\dot{C}_e = c_e B_e = c_e (\dot{m}_e b_e) \quad - \quad \text{custo exergético nas entradas do VC}$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad - \quad \text{custo exergético das potências}$$

$$\dot{C}_Q = c_Q B_Q \quad - \quad \text{custo exergético de transferência de calor}$$

tendo c_s , c_e , c_w e c_Q (\$/GJ).

O balanço de custos se reduz a: “a soma dos custos associados às correntes de exergia que saem é igual à soma dos custos associados às correntes de exergia que entram com os custos de investimento e operação/manutenção”, como segue na equação (11):

$$\sum_s \dot{C}_s + \dot{C}_w = \dot{C}_Q + \sum_e \dot{C}_e + \dot{Z}_I + \dot{Z}_{OM} \quad (11)$$

Assumindo $\dot{Z} = \dot{Z}_I + \dot{Z}_{OM}$, para o k-ésimo componente ter-se-á a expressão dada pela equação (12).

$$\sum_s c_{s,k} B_{s,k} + c_{w,k} \dot{E}x_{w,k} = c_{Q,k} \dot{E}x_{Q,k} + \sum_e c_{e,k} \dot{E}x_{e,k} + \dot{Z} \quad (12)$$

A aplicação do balanço de custos implica na tomada de decisões acerca da partição de custos, especialmente nos sistemas de cogeração, que geram dois produtos distintos, \dot{W} e \dot{Q} , em que a maior ou menor valorização de cada um deles pode viabilizar ou não sua produção para venda. A teoria de custo exergético apresenta uma fotografia da configuração proposta, em termos de custos de cada fluxo, que não representam os melhores valores (ou ótimos), mas apenas a realidade expressa por certo conjunto de condições impostas ao problema.

Uma questão pertinente passa a ser, dessa forma, como são obtidos os diferentes elementos presentes em formulações como a acima apresentada. Dispõe-se de um número limitado de equações e são passíveis de serem calculados os valores de custo de investimento e operação/manutenção, as exergias e as potências envolvidas pelas análises de 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, bem como os custos envolvendo equipamentos e para a composição ar-combustível. Com isso, restam incógnitas que somente podem ser valores calculadas se novas relações forem adicionadas ao problema.

3.2.1 Teoria do custo exerético

Pela Teoria do Custo Exerético pode-se obter o custo de todos os fluxos que se inter-relacionam com uma estrutura formada por um sistema, cujos limites tenham sido definidos e com um nível de agregação que especifica os subsistemas que o compõe (LOZANO; VALERO, 1993). A relação entre os fluxos (m fluxos) e componentes (n componentes) se estabelece mediante uma matriz de incidência A (n,m); os elementos a_{ij} da matriz A assumem valores $+1$ quando o fluxo j entra no subsistema i , -1 quando o abandona e 0 quando não existe relação física entre eles.

Para a associação dos custos, empregam-se 5 proposições (LOZANO; VALERO, 1993):

Proposição 1: o custo exerético de um fluxo (B^*), produto (P^*) ou insumo (F^*) é a quantidade de exergia necessária para produzi-lo, sendo portanto uma propriedade conservativa. Esta proposição permite que sejam formuladas tantas equações de balanço de custo exerético quantos componentes compuserem a instalação. De modo matricial (13):

$$A B^* = 0^* \quad (13)$$

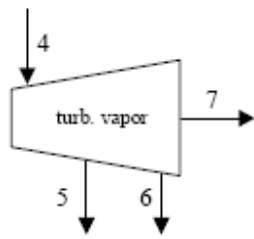
sendo 0^* o vetor nulo.

Se existem m fluxos, são necessárias m equações independentes para encontrar uma solução de compromisso entre as variáveis. Como a instalação conta com n componentes, com a proposição 1 já se dispõe de n equações independentes, sendo necessárias $(m-n)$ equações adicionais para a solução. Esta formulação é construída com as n equações disponíveis para os respectivos n componentes da instalação.

Proposição 2: o custo exerético dos fluxos de entrada da instalação (combustível, ar, água) é igual à sua exergia.

Proposição 3: se um ou mais fluxos de saída de um componente fazem parte do insumo (F), deve-se considerar que sua(s) exergia(s) não está(ão) em jogo, e portanto seu(s) custo(s) exerético(s) unitário(s) (B^*/B) é idêntico ao custo exerético unitário⁶ do fluxo de entrada que o(s) precede(m) como mostram as Figuras 8, 9 e 10 e equações (14, 15 e 16) respectivas.

⁶ Define-se custo exerético unitário como $k^* = B^*/B = 1/\eta$

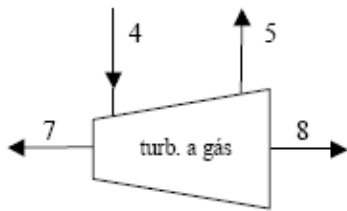


$$F = B_4 - B_5 - B_6$$

$$\frac{B_4^*}{B_4} = \frac{B_5^* + B_6^*}{B_5 + B_6}$$

(14)

Figura 8 - Fluxos de saída da turbina a vapor (fazem parte do insumo).

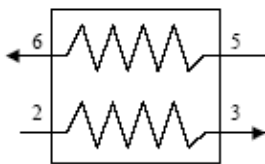


$$F = B_4 - B_5$$

$$\frac{B_4^*}{B_4} = \frac{B_5^*}{B_5}$$

(15)

Figura 9 - Fluxos de saída da turbina a gás (fazem parte do insumo).



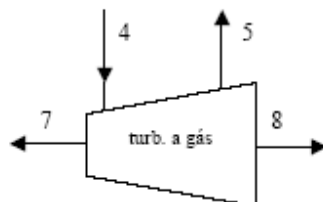
$$F = B_5 - B_6$$

$$\frac{B_5^*}{B_5} = \frac{B_6^*}{B_6}$$

(16)

Figura 10 - Fluxos de saída da caldeira de recuperação (fazem parte do insumo).

Proposição 4: se um componente tem um produto (P) formado por vários fluxos, deve-se associar a esses fluxos o mesmo custo exergético unitário. Isso se explica pelo fato de que se 2 ou mais produtos podem se identificados em um mesmo equipamento, seus processos de formação são indistintos no nível de agregação considerado, e portanto deve-se associar um custo exergético proporcional à exergia que contém como mostra a Figura 11 e equação (17).



$$P = B_7 + B_8$$

$$\frac{B_7^*}{B_7} = \frac{B_8^*}{B_8}$$

(17)

Figura 11 - Fluxos de saída da turbina a gás (fazem parte do produto).

Proposição 5: na ausência de valores externos aos fluxos de perdas (calor cedido ao meio, gases de chaminé, dentre outros) deve-se atribuir custo exergético nulo, já que não apresentam utilidade posterior.

3.3 Modelos de avaliação econômica

Os modelos de avaliação econômica são empregados após a definição de um ciclo térmico para que a empresa tome a decisão entre investir ou não naquele empreendimento. Para isso, empregam-se algumas das técnicas tradicionais, a saber: o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e o tempo de retorno do investimento (*payback*). Recomenda-se que sempre sejam verificados os valores de ao menos duas das técnicas, sendo que as duas primeiras são aquelas mais freqüentemente empregadas; tais modelos são recorrentes na literatura e sugere-se a leitura de Quintela (2003) para maiores detalhes.

3.4 Modelos de otimização

Os procedimentos de otimização se constituem de formulações que conduzem à solução de um problema físico qualquer a valores extremos (máximos ou mínimos, de acordo com os objetivos perseguidos) de uma maneira rápida, segura e coerente. Aos modelos de otimização contrapõem-se à pesquisa por tentativa e erro, a qual – não alicerçada em teorema que assegure a eliminação de caminhos pouco prováveis a alcançar os melhores resultados – conduz a busca a uma procura exaustiva na medida do esforço dispensado, e nem sempre com uma linha de ação pré-definida para a variação dos parâmetros envolvidos.

Um modelo não é igual à realidade, mas se devidamente formulado pode representar de forma suficientemente similar o problema em estudo para que as conclusões obtidas por meio de sua análise e/ou operação possam ser estendidas à realidade (GOLDBARG; LUNA, 2000). Em consequência, para a formalização desse modelo é indispensável definir:

- A estrutura relacional do sistema apresentado;
- O comportamento funcional de cada subsistema ou componente;
- Os fluxos de interrelacionamento.

A solução de um problema que envolva sistemas energéticos necessariamente está associada a um profundo conhecimento e domínio da aplicação dos conceitos de

Termodinâmica, Mecânica de Fluidos e Transferência de Calor e Massa, sem os quais um modelo de otimização pouco ou nada pode oferecer.

O problema de otimização busca colher elementos para uma tomada de decisão a partir da maximização (ou minimização) de um ou mais objetivos sujeitos as restrições que podem limitar a seleção dos valores das variáveis de decisão. Habilidade de modelagem, para captar os elementos essenciais do problema, e bom julgamento na interpretação dos resultados, são elementos necessários para que conclusões significativas em um problema de otimização possam ser obtidas.

Fazem parte de um modelo de otimização dois conjuntos de equações:

- *Função objetivo*: indicativa do sentido no qual se busca a otimização, isto é, maximizar ou minimizar uma equação (quase sempre em casos que consideram o aspecto econômico do problema) ou mais de uma equação (os chamados problemas multiobjetivos, considerados mais próximos da realidade);
- *Restrições*: Um problema sem restrições permite que a função se maximize tendendo ao infinito ou se minimize com valor nulo para as variáveis do problema; as restrições representam limites reais do problema e sua disposição conjunta no espaço R configura a chamada região factível (ou região viável), e devem contemplar, em problemas físicos reais da área de Energia, balanços de massa e de energia, condições de cinética química, limites tecnológicos de equipamentos, limites de disponibilidade de recursos, dentre outras equações aplicáveis a cada problema.

Um problema de otimização pode ser formalizado matematicamente a partir das equações (18) e (19).

Minimizar $f(x)$

Sujeito a:

$$\left\{ \begin{array}{ll} h_i(x) = 0, & i = 1, \dots, m_h \\ g_j(x) \leq 0, & j = 1, \dots, m_g \\ x \in R^n \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (18) \\ (19) \end{array}$$

em que $f(x): R^n \rightarrow R$ e $h_i(x): R^n \rightarrow R$ são funções contínuas, geralmente diferenciáveis em problemas tratáveis de grande porte; $f(x)$ representa a função objetivo, $h_i(x)$ representa as equações de restrição relativas aos balanços de massa e energia, p.ex., e $g_j(x)$ representa as equações de restrição relativas às faixas de atuação dos componentes, como os limites tecnológicos e de disponibilidade de combustíveis.

4. ESTUDO DE CASO

A proposta de superestrutura passa primeiramente pelo levantamento da necessidade energética de um condomínio residencial que abriga 30 apartamentos, compostas de uma pessoa por apartamento, em média. Para tanto, o levantamento das necessidades passa por inferências baseadas no consumo médio de energia elétrica considerando as variações sazonais e flutuações ao longo do dia.

O perfil de despacho de cargas foi traçado através dos dados obtidos com a leitura dos medidores de energia elétrica de cada unidade de apartamento, feita de hora em hora de um típico dia de verão. A mesma medição foi executada em um típico dia de inverno, com o intuito de obter os picos opostos do perfil de consumo, dada as sazonalidades possíveis como segue na Tabela 2.

Tabela 2 – Consumo de energia elétrica horário do condomínio (kWh).

Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Verão	7,7	7,8	7,9	7,10	7,11	11	15,4	0,15	0,15	0,15	0,3	5	3	0,2	0,2	0,2	0,2	5,8	3,7	0,4	0,15	0,15	0,9	0,6
Inverno	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,18	25	0,1	0,1	0,1	0,1	6	2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,15	0,5	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8

Por se tratar de uma planta de geração de energia cogenerada, o mesmo perfil de consumo médio foi obtido através da leitura do relógio de vazão de água quente, como segue na Tabela 3.

Tabela 3 – Consumo de água quente horário do condomínio (L/h).

Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Verão	20	10	10	5	0	130	130	50	0	0	10	20	10	0	0	0	0	50	250	150	0	0	300	200
Inverno	300	50	50	50	20	300	250	50	10	10	20	40	40	5	5	10	10	150	450	350	20	30	865	815

De posse destes dados dimensionou-se um reservatório de água quente e um banco de baterias, para suprir as horas de pico de consumo sem que haja a compra da energia elétrica pela concessionária, tornando-a assim uma estrutura autossuficiente. Porém, as variações dos períodos também contemplam a possibilidade de compra de energia elétrica e venda à concessionária se for evidenciada vantagem comercial nesta possibilidade, representando assim uma receita ao condomínio.

O perfil de consumo possibilitou a obtenção do consumo médio por unidade de apartamento de 85 kWh/mês⁷. Ao se tratar de um sistema de microgeração tem-se também a geração da energia térmica, no caso a água quente a ser consumida por essas famílias. O consumo médio *per capita* de água quente é estimado algo próximo de 50 litros por dia⁸.

Como estabelecido nesta análise, pode-se ter uma configuração que gere potência suficiente para todo o condomínio, como também se pode comprar energia elétrica quando há falta ou até mesmo vender a energia elétrica à concessionária quando houver excedente demonstrado pela Figura 12. Os equipamentos FC1, FC4, MC1 e MCI4 geram potência elétrica inferior à necessidade do condomínio, portanto necessitando da compra da energia disponibilizada pela concessionária local (XWC). No segundo nível apresentam-se os equipamentos FC2, FC5, MCI2 e MCI5, que geram potência suficiente frente à necessidade do condomínio, não necessitando de nenhuma comercialização com a concessionária local. No último nível encontram-se os equipamentos FC3, FC6, MCI3 e MCI6, que geram energia excedente a necessidade do condomínio, podendo assim comercializar a venda desta energia (XWV) com a concessionária local.

No caso da água quente, toda a produção será armazenada em um reservatório uma vez que a superestrutura trabalha em paridade térmica. Com isso, há a necessidade de se ter um reservatório específico para armazenar a água quente, dada as flutuações no consumo ao longo do dia, sujeito ainda às sazonalidades. Este tanque em específico tem 2000 litros de capacidade e opera a uma temperatura de 80 °C.

Os equipamentos geradores de energia da superestrutura estão definidos na Tabela 4, na qual seis motores a combustão interna e seis células-combustível compõem a configuração. A idéia de se considerar estas duas tecnologias de equipamentos é comparar a aquisição de um equipamento bem difundido no mercado com uma tecnologia em desenvolvimento que polua menos e que faça menos ruído. É possível verificar a disposição dos equipamentos geradores na Figura 12.

Outra vertente da análise diz respeito aos combustíveis que deverão ser utilizados nestas configurações. Optou-se pela seleção de dois combustíveis para as células-combustível, o metanol e o hidrogênio, enquanto que para os motores a combustão interna os combustíveis selecionados são o óleo diesel e o gás natural cujos fluxos são demonstrado na Figura 12

⁷ A curva de consumo dos apartamentos constituintes de um condomínio residencial, destinado a estudantes, situado na cidade de Bragança Paulista – SP, foi considerada para este estudo de caso.

⁸ Considerou-se a utilização diária de 2 horas de um chuveiro, e de 1 hora para a torneira da cozinha e torneira do banheiro. Segundo simulador da Sabesp, a soma destas utilizações resultam num consumo diário de 0,486 m³ de água (SABESP, 2012a).

através do ponto C. Originalmente procurou-se selecionar equipamentos que disponibilizassem informações relativas à queima de biodiesel, mas não foram encontrados equipamentos comerciais na faixa de potência em questão com tais características.

Tem-se por objetivo obter a maior receita da configuração proposta, bem como otimizar os custos envolvidos e trabalhar com estes equipamentos fornecendo alta eficiência. Para tanto, será utilizado o software LINGO 10.0 (LINGO, 2010) para auxiliar na análise de qual configuração é mais vantajosa e quais os prós e contras de cada uma. Considerou-se a seleção de equipamentos comerciais, tendo como ponto de partida os valores de entrada e saída (vazões e potências) apresentados nos catálogos dos fabricantes.

A comercialização de energia elétrica tem como base o consumo que leva em consideração a flutuação de consumo do condomínio hora à hora, tanto de energia elétrica quanto em energia térmica. Como são observados comportamentos de consumo diferenciados devido à sazonalidade, consideraram-se as primeiras 24 horas de um dia e verão conhecido como período úmido devido à alta frequência de chuvas, e posteriormente 24 horas de um dia de inverno, considerado período seco devido à baixa frequência de chuvas.

A superestrutura demonstrada através da Figura 12 conta com a geração de energia elétrica que é destinada ao banco de baterias (BAT), e a água quente destinada ao reservatório de água quente (RES). Os produtos gerados são destinados ao consumo do condomínio residencial (COND), onde ainda há a possibilidade de comercialização da energia elétrica com a concessionária (XWV, XWC). Os insumos utilizados pelos equipamentos geradores, como a água (A), os combustíveis (C) e o ar (AR) também estão demonstrados na Figura 12.

Todas as vazões e correntes presentes na superestrutura demonstrada na Figura 12 estão identificadas através dos pontos termodinâmicos que estão dispostos na Tabela 5, onde é possível encontrar todos os parâmetros de vazões, energia e exergia que balizam os cálculos técnicos.

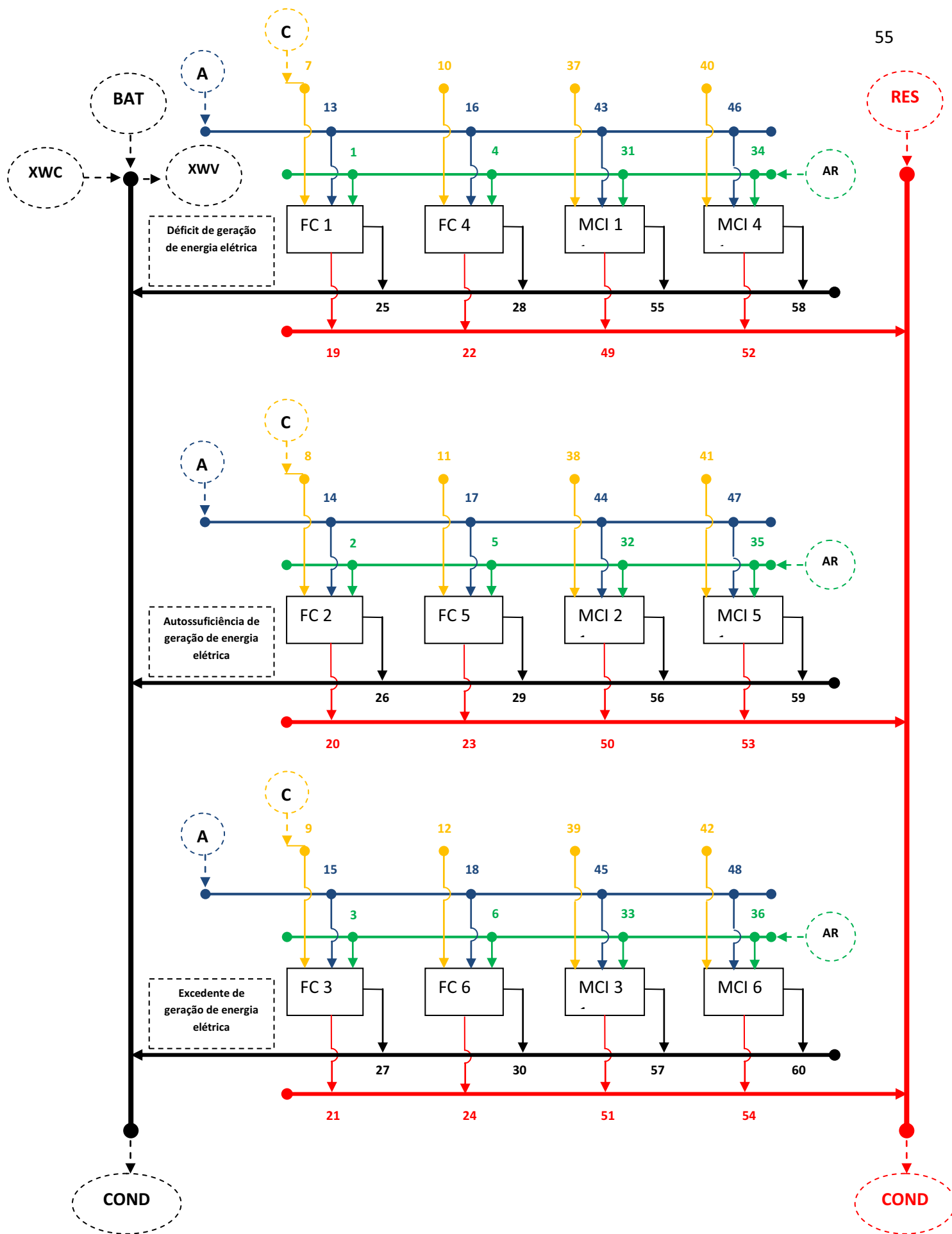


Figura 12 – Diagrama da superestrutura proposta

Tabela 4 – Seleção dos equipamentos da superestrutura

Modelo	Fabricante	Combustível	Potência (kW)	Consumo de combustível (kW)	combustível (kg/s)	Calor recuperado (kW)	Vazão de água quente (L/seg)	Eficiência Global (%)	Eficiência elétrica (%)	Recuperação de calor (%)	água quente (°C)	Valor (US\$)	Disponível em :
CP5VB - SN (P) J	Yanmar	GN	5,0	17,20000	0,0003357	9,6	0,5	85,0	29,0	56,00	80,00	1750	www.yanmar.co.jp/en/energy/cogeneration/5kw.html
CP10WB1	Yanmar	GN	9,9	31,40000	0,0006129	16,8	0,8	85,0	31,5	53,5	80,00	3465	www.yanmar.co.jp/en/energy/cogeneration/9.9kw.html
CP25VB2	Yanmar	GN	25,0	74,60000	0,0014560	38,4	1,8	85,0	33,5	51,5	80,00	8750	www.yanmar.co.jp/en/energy/cogeneration/25kw.html
GL 7000	Kubota	Diesel	7,0	26,06449	0,0006139	9,7	0,5	63,9	26,9	37,06	80,00	2450	www.kubotaengine.com
GL11000	Kubota	Diesel	11,0	41,10170	0,0009681	17,2	0,8	68,6	26,8	41,85	80,00	3850	www.kubotaengine.com
SQ - 33	Kubota	Diesel	25,2	90,22325	0,0021250	42,1	2,0	74,6	27,9	46,66	80,00	8820	www.kubotaengine.com
EFOY PRO series	SFC	Metanol	5,5	14,86000	0,0007719	7,9	0,0	90,0	37,0	53,00	80,00	3245	http://pdf.directindustry.com/pdf/incat/fuel-cell-22825-56755-2.html
EFOY PRO series	SFC	Metanol	11,1	30,00000	0,0015584	15,9	0,1	90,0	37,0	53,00	80,00	6549	http://pdf.directindustry.com/pdf/incat/fuel-cell-22825-56856.html
EFOY PRO series	SFC	Metanol	31,1	84,00000	0,0043636	44,5	0,2	90,0	37,0	53,00	80,00	18349	http://pdf.directindustry.com/pdf/incat/fuel-cell-22825-131908-2.html
HyPM XR4	Hydrogenics	Hidrogenio	4,5	8,18000	0,0000681	2,86	0,0	90,0	55,0	35,00	80,00	2655	http://pdf.directindustry.com/pdf/incat/fuel-cell-33492-75121-5.html
HyPM XR8	Hydrogenics	Hidrogenio	8,5	15,45000	0,0001287	5,4	0,1	90,0	55,0	35,00	80,00	5015	http://pdf.directindustry.com/pdf/incat/fuel-cell-22782-25251-2.html
HyPM XR12	Hydrogenics	Hidrogenio	12,5	22,70000	0,0001890	7,9	0,1	90,0	55,0	35,00	80,00	7375	

Para a configuração da Figura 12 foram determinados os valores termodinâmicos que compõem a configuração completa, que são apresentados na Tabela 5, levando em consideração apenas as condições dos insumos e dos produtos gerados nos seis tipos de equipamentos geradores citados na Tabela 4.

Tabela 5 - Dados termodinâmicos da configuração

pto	Nome	m (kg/s)	P (MPa)	T (oC)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	EN (kW)	EX (kW)	EXQ (kW)	EXT (kW)
1	ARF1	0,009263	0,1	25	104,6	0,3673	9,8524058	0,003981	4,922221	4,9262029
2	ARF2	0,018701	0,1	25	104,6	0,3673	19,890456	0,008038	9,93719	9,9452279
3	ARF3	0,052364	0,1	25	104,6	0,3673	55,693276	0,022506	27,82413	27,846638
4	ARF4	0,000817	0,1	25	104,6	0,3673	0,8694272	0,000351	0,434362	0,4347136
5	ARF5	0,001544	0,1	25	104,6	0,3673	1,6421333	0,000664	0,820403	0,8210666
6	ARF6	0,002268	0,1	25	104,6	0,3673	2,4127136	0,000975	1,205382	1,2063568
7	Xmt1	0,000772					59,61	14,94452	14,86	29,804517
8	Xmt2	0,001558					120,34	30,17063	30	60,170626
9	Xmt3	0,004364					336,96	84,47775	84	168,47775
10	Xh24	6,81E-05					60,30	8,187458	21,96279	30,150248
11	Xh25	0,000129					113,89	15,46409	41,48229	56,946374
12	Xh26	0,000189					167,34	22,7207	60,94809	83,668782
13	A1	0,0393	6	35	152	0,5031	1,87854	0,289303	0	0,289303
14	A2	0,0793	6	35	152	0,5031	3,79054	0,583759	0	0,583759
15	A3	0,22	6	35	152	0,5031	10,516	1,619508	0	1,619508
16	A4	0,032	6	35	152	0,5031	1,5296	0,235565	0	0,2355648
17	A5	0,061	6	35	152	0,5031	2,9158	0,449045	0	0,4490454
18	A6	0,089	6	35	152	0,5031	4,2542	0,655165	0	0,6551646
19	Xaqf1	0,0393		80	335	1,075	9,07044	0,783453	0	0,7834534
20	Xaqf2	0,0793		80	335	1,075	18,30244	1,580861	0	1,5808614
21	Xaqf3	0,22		80	335	1,075	50,776	4,385744	0	4,385744
22	Xaqf4	0,032		80	335	1,075	7,3856	0,637926	0	0,6379264
23	Xaqf5	0,061		80	335	1,075	14,0788	1,216047	0	1,2160472
24	Xaqf6	0,089		80	335	1,075	20,5412	1,774233	0	1,7742328
25	XPelf1									5,5
26	XPelf2									11,1
27	XPelf3									31,1
28	XPelf4									4,5
29	XPelf5									8,5
30	XPelf6									12,5
31	ARM1	0,0047	0,1	25	104,6	0,3673	0,0018799	0,00202	2,497319	2,4993385
32	ARM2	0,00858	0,1	25	104,6	0,3673	0,003432	0,003688	4,559058	4,5627459
33	ARM3	0,020384	0,1	25	104,6	0,3673	0,0081537	0,008761	10,83139	10,840154
34	ARM4	0,008594	0,1	25	104,6	0,3673	0,0034378	0,003694	4,566775	4,5704691
35	ARM5	0,013553	0,1	25	104,6	0,3673	0,0054211	0,005825	7,201453	7,2072783
36	ARM6	0,02975	0,1	25	104,6	0,3673	0,0119	0,012787	15,80807	15,820855
37	Xgn1	0,000336					17,20	17,23675	18,06265	35,299404
38	Xgn2	0,000613					31,40	31,4671	32,97484	64,441936
39	Xgn3	0,001456					74,60	74,75941	78,34149	153,1009
40	Xdi4	0,000614					26,06	26,13171	21,85201	47,983716
41	Xdi5	0,000968					41,10	41,20769	34,45894	75,666628
42	Xdi6	0,002125					90,22	90,45591	75,64157	166,09748
43	A7	0,46	6	35	152	0,5031	21,988	3,386244	0	3,386244
44	A8	0,803333	6	35	152	0,5031	38,399333	5,913658	0	5,913658
45	A9	1,833333	6	35	152	0,5031	87,633333	13,4959	0	13,4959
46	A10	0,46	6	35	152	0,5031	21,988	3,386244	0	3,386244
47	A11	0,82	6	35	152	0,5031	39,196	6,036348	0	6,036348
48	A12	2,017	6	35	152	0,5031	96,4126	14,84794	0	14,847944
49	Xaqm1	0,46		80	335	1,075	106,168	9,170192	0	9,170192
50	Xaqm2	0,803333		80	335	1,075	185,40933	16,01461	0	16,014611

Tabela 5 - Dados termodinâmicos da configuração (continuação)

pto	Nome	m (kg/s)	P (MPa)	T (oC)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	EN (kW)	EX (kW)	EXQ (kW)	EXT (kW)
51	Xaqm3	1,8333		80	335	1,075	423,1333	36,5479	0,0000	36,5479
52	Xaqm4	0,4600		80	335	1,075	106,1680	9,1702	0,0000	9,1702
53	Xaqm5	0,8200		80	335	1,075	189,2560	16,3469	0,0000	16,3469
54	Xaqm6	2,0170		80	335	1,075	465,5236	40,2093	0,0000	40,2093
55	Xpelm1									5,0000
56	Xpelm2									9,9000
57	Xpelm3									25,0000
58	Xpelm4									7,0000
59	Xpelm5									11,0000
60	Xpelm6									25,2000
61	Ex1	0,0050		400			-0,5247	0,7657		0,7657
62	Ex2	0,0092		400			-0,9579	1,3979		1,3979
63	Ex3	0,0218		400			-2,2757	3,3212		3,3212
64	Ex4	0,0092		400			-0,9595	1,4003		1,4003
65	Ex5	0,0145		400			-1,5131	2,2082		2,2082
66	Ex6	0,0319		400			-3,3214	4,8472		4,8472
67	Perda Fc1						0,5500	0,5500		0,5500
68	Perda Fc2						1,1100	1,1100		1,1100
69	Perda Fc3						3,1100	3,1100		3,1100
70	Perda Fc4						0,4500	0,4500		0,4500
71	Perda Fc5						0,8500	0,8500		0,8500
72	Perda Fc6						1,2500	1,2500		1,2500
73	Perda MC1						0,7500	0,7500		0,7500
74	Perda MC2						1,4850	1,4850		1,4850
75	Perda MC3						3,7500	3,7500		3,7500
76	Perda MC4						2,5257	2,5257		2,5257
77	Perda MC5						3,4529	3,4529		3,4529
78	Perda MC6						6,4026	6,4026		6,4026
79	Perda Bat1						0,0028	0,0028		0,0028
80	Perda Bat2						0,0056	0,0056		0,0056
81	Perda Bat3						0,0156	0,0156		0,0156
82	Perda Bat4						0,0023	0,0023		0,0023
83	Perda Bat5						0,0043	0,0043		0,0043
84	Perda Bat6						0,0063	0,0063		0,0063
85	Perda Bat7						0,0025	0,0025		0,0025
86	Perda Bat8						0,0050	0,0050		0,0050
87	Perda Bat9						0,0125	0,0125		0,0125
88	Perda Bat10						0,0035	0,0035		0,0035
89	Perda Bat11						0,0055	0,0055		0,0055
90	Perda Bat12						0,0126	0,0126		0,0126
91	Perda Res 1						0,0078	0,0078		0,0078
92	Perda Res 2						0,0158	0,0158		0,0158
93	Perda Res 3						0,0439	0,0439		0,0439
94	Perda Res 4						0,0064	0,0064		0,0064
95	Perda Res 5						0,0122	0,0122		0,0122
96	Perda Res 6						0,0177	0,0177		0,0177
97	Perda Res 7						0,0917	0,0917		0,0917
98	Perda Res 8						0,1601	0,1601		0,1601
99	Perda Res 9						0,3655	0,3655		0,3655
100	Perda Res 10						0,0917	0,0917		0,0917
101	Perda Res 11						0,1635	0,1635		0,1635
102	Perda Res 12						0,4021	0,4021		0,4021
103	DW1						6,0000	6,0000		6,0000
104	DW2						6,0000	6,0000		6,0000
105	DW3						6,0000	6,0000		6,0000
106	DW4						6,0000	6,0000		6,0000
107	DW5						6,0000	6,0000		6,0000
108	DW6						6,0000	6,0000		6,0000
109	DW7						6,0000	6,0000		6,0000
110	DW8						6,0000	6,0000		6,0000

Tabela 5 - Dados termodinâmicos da configuração (continuação).

pto	Nome	m (kg/s)	P (MPa)	T (oC)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	EN (kW)	EX (kW)	EXQ (kW)	EXT (kW)
111	DW9						6,0000	6,0000		6,0000
112	DW10						6,0000	6,0000		6,0000
113	DW11						6,0000	6,0000		6,0000
114	DW12						6,0000	6,0000		6,0000
115	DAQ1	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
116	DAQ2	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
117	DAQ3	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
118	DAQ4	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
119	DAQ5	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
120	DAQ6	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
121	DAQ7	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
122	DAQ8	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
123	DAQ9	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
124	DAQ10	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
125	DAQ11	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054
126	DAQ12	0,0610		35	152	0,5	2,9158	0,5054		0,5054

4.1 Modelagem dos custos exergeticos

A obtenção dos custos exergeticos das vazões e correntes de saída do sistema de microgeração proposto se faz a partir da Teoria do Custo Exergetico (LOZANO; VALERO, 1993), pautado em cinco proposições que são descritas através de figuras. A proposição 1 refere-se ao balanço dos fluxos, a proposição 2 refere-se aos fluxos de entrada da configuração, a proposição 3 refere-se aos fluxos referentes aos insumos, a proposição 4 refere-se aos fluxos que envolvem os produtos e por fim a proposição 5 que se refere aos fluxos que representam as perdas. O conjunto de equações resultante de tal modelagem é calculado matricialmente para a obtenção dos valores exergeticos unitários.

4.1.1 Proposição 1

O custo exergetico de um fluxo (B^*) é a quantidade de exergia necessária para produzi-lo, sendo, portanto uma propriedade conservativa demonstrada nas Figuras 13 a 16, sendo os valores dispostos entre parênteses correspondentes aos pontos termodinâmicos dispostos na Tabela 5.

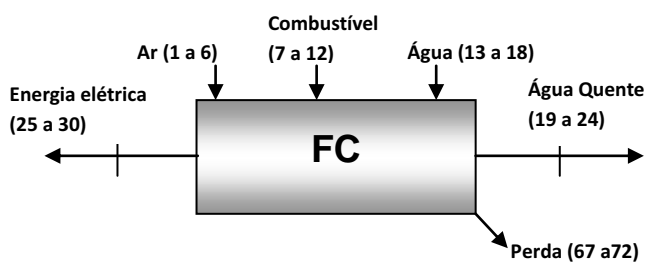


Figura 13 - Fluxos da célula-combustível

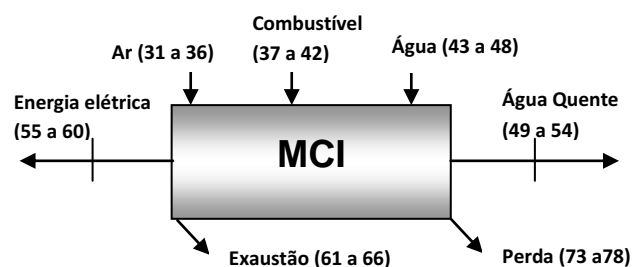


Figura 14 - Fluxos do motor de combustão interna



Figura 15 - Fluxos do reservatório de água quente.

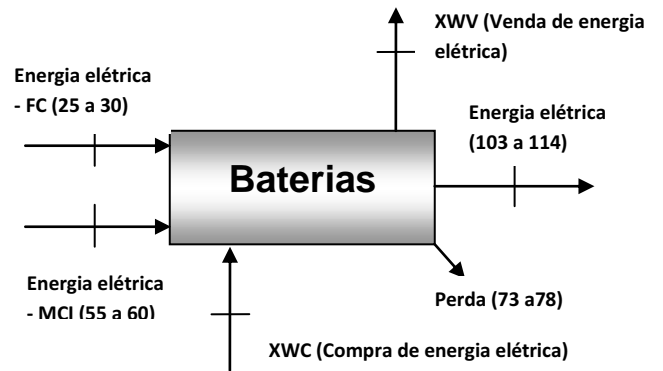


Figura 16 - Fluxos da bateria.

Se existirem “n” fluxos, será necessário estabelecer “n” equações a fim da busca da solução, portanto seguem as equações (20) a (23) que regem a proposição 1 e são demonstradas nas figuras 13 a 16.

$$B^*_{AR} + B^*_{Comb} + B^*_{Água} = B^*_{Perda} + B^*_{ÁguaQuente} + B^*_{EnergiaElétrica} \quad (20)$$

$$B^*_{AR} + B^*_{Comb} + B^*_{Água} = B^*_{Perda} + B^*_{ÁguaQuente} + B^*_{EnergiaElétrica} + B_{Exaustão} \quad (21)$$

$$B^*_{ÁguaQuente_{FC}} + B^*_{ÁguaQuente_{MCI}} = B^*_{Perda} + B^*_{ÁguaQuente} \quad (22)$$

$$B^*_{EnergiaElétrica_{FC}} + B^*_{EnergiaElétrica_{MCI}} + B^*_{Compra} = B^*_{Perda} + B^*_{EnergiaElétrica} + B^*_{Venda} \quad (23)$$

4.1.2 Proposição 2

Por esta proposição, adotam-se valores iguais a sua exergia nos pontos como demonstrado através das equações de (24) a (29):

- Ar de entrada para a combustão das células e motores a combustão interna.

$$B^*_{AR_{FC}} = B_{AR_{FC}} \quad (24)$$

$$B^*_{AR_{MCI}} = B_{AR_{MCI}} \quad (25)$$

- Água de entrada para a jaqueta dos motores a combustão interna e água para troca de calor na célula-combustível.

$$B^*_{A_{MCI}} = B_{A_{MCI}} \quad (26)$$

$$B^*_{AFC} = B_{AFC} \quad (27)$$

- Combustíveis das células e dos motores a combustão interna.

$$B^*_{Comustível_{FC}} = B_{Comustível_{FC}} \quad (28)$$

$$B^*_{Comustível_{MCI}} = B_{Comustível_{MCI}} \quad (29)$$

4.1.3 Proposição 3

Se um ou mais fluxos de saída de um componente fazem parte do insumo (F), deve-se considerar que sua(s) exergia(s) não está(ão) em jogo, e portanto seu(s) custo(s) exergético(s) unitário(s) (B^*/B) é idêntico ao custo exergético unitário do fluxo de entrada que o(s) precede(m) como demonstrado através das Figuras 17 e 18 e equações (30) e (31).



Figura 17 – Insumos que compõem a bateria

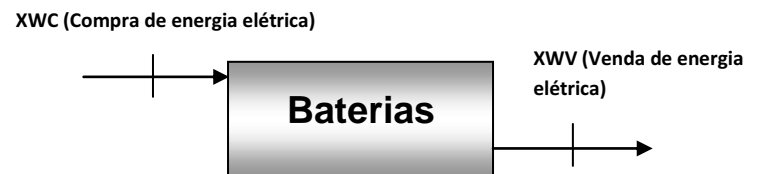


Figura 18 – Insumos que compõem a bateria

$$B^*_{EnergiaElétrica_{MCI}} - \left(\frac{B_{EnergiaElétrica_{MCI}}}{B_{EnergiaElétrica}} \right) B^*_{EnergiaElétrica} = 0 \quad (30)$$

$$B^*_{CompradeEnergiaElétrica} - \left(\frac{B_{CompradeEnergiaElétrica}}{B_{VendadeEnergiaElétrica}} \right) B^*_{VendadeEnergiaElétrica} = 0 \quad (31)$$

4.1.4 Proposição 4

Se um componente tem um produto (P) formado por vários fluxos, deve-se associar a esses fluxos o mesmo custo exergético unitário representados pelas Figuras 19 a 21 e equações de (32) a (34).



Figura 19 – Produtos do MCI

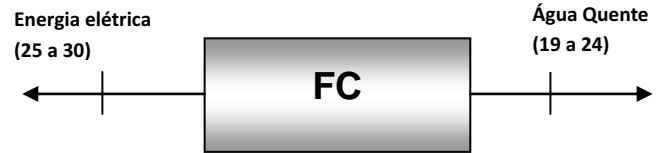


Figura 20 – Produtos da célula-combustível.



Figura 21 – Produtos que compõem a bateria.

$$B^*_{EnergiaElétrica_{MCI}} - \left(\frac{B_{EnergiaElétrica_{MCI}}}{B_{ÁguaQuente_{MCI}}} \right) B^*_{ÁguaQuente_{MCI}} = 0 \quad (32)$$

$$B^*_{EnergiaElétrica_{FC}} - \left(\frac{B_{EnergiaElétrica_{FC}}}{B_{ÁguaQuente_{FC}}} \right) B^*_{ÁguaQuente_{FC}} = 0 \quad (33)$$

$$B^*_{VendaEnergiaElétrica} - \left(\frac{B_{VendaEnergiaElétrica}}{B_{EnergiaElétrica}} \right) B^*_{EnergiaElétrica} = 0 \quad (34)$$

4.1.5 Proposição 5

Por meio desta proposição, adotam-se valores exergéticos iguais a 0 nos pontos como demonstrados através das equações (35) a (39).

- Produtos da combustão gerados nos motores a combustão interna à atmosfera.

$$B^*_{Exaustão} = B_{Exaustão} \quad (35)$$

- Perda no conversor AC/DC das células-combustíveis

$$B^*_{Perda_{FC}} = B_{Perda_{FC}} \quad (36)$$

- Perda no gerador elétrico dos motores a combustão interna

$$B^*_{Perda_{MCI}} = B_{Perda_{MCI}} \quad (37)$$

- Perda na bateria

$$B^*_{Perda_{BAT}} = B_{Perda_{BAT}} \quad (38)$$

- Perda no reservatório

$$B^*_{Perda_{Res}} = B_{Perda_{Res}} \quad (39)$$

4.1.6 Custos exergoeconômicos

Para a aplicação da Teoria do Custo Exergético, devem ser aplicados inicialmente os balanços de massa, de energia e exergia, que na forma matricial permitindo o cálculo dos custos exergéticos (B^*) e custos exergoeconômicos (P) que se expressam conforme abaixo indicado através das equações 40 e 41.

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} = \underline{Y}^* \Rightarrow B^* = \underline{A}^{-1} \underline{Y}^* \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} \Pi = \begin{bmatrix} -Z \\ \omega_Z \end{bmatrix} = \underline{Z}^* \Rightarrow \Pi = \underline{A}^{-1} \underline{Z}^* \quad (41)$$

Pela solução do conjunto de equações apresentadas, foram então obtidos os valores dos custos exergéticos unitários dos produtos e, através destes, o valor dos produtos finais da central de cogeração.

A Tabela 6 identifica a matriz de incidência modificada A de apenas 1 motor a combustão interna (MC1), obtida a partir da estruturação das equações (20) a (49). Cada equipamento gerador terá sua tabela de incidência, ou seja, serão estabelecidas doze tabelas no total, que serão fundidas em uma única para cálculo final. A Tabela 7 identifica a matriz inversa de A , de acordo com as equações (40) e (41).

Tabela 6 – Matriz de incidência modificada (A) do motor MC1.

Pto.	Equipamento	ARM1	Xgn1	A7	Xaqm1	Xpelm1	Ex1	Perda MC1	Perda Bat 7	Perda Res 7	DW7	DAQ7
1	MC1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0
	BAT7	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	-1	0
	RES	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	-1
2	AR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	XGN	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	PER MC	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	PER RES	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	PER BAT	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	FC1	0	0	0	1	-1.8340384	0	0	0	0	0	0
5	EX	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Tabela 7 – Matriz de incidência modificada inversa (A^{-1}) do motor MC1.

Pto.	ARM1	Xgn1	A7	Xaqm1	Xpelm1	Ex1	Perda MC1	Perda Bat 7	Perda Res 7	DW7	DAQ7
1	5,5511E-17	0	0	1	-5,551E-17	-5,551E-17	0	0	0	0	0
	5,5511E-17	0	0	-5,551E-17	1	-5,551E-17	0	0	0	0	0
	-1,665E-16	0	0	1,6653E-16	1,6653E-16	1	-2,22E-16	0	0	5,5511E-17	-2,22E-16
2	-0,6471466	0	0	0,64714663	0,64714663	0,64714663	-0,6471466	0	0	0,35285337	-0,6471466
	-0,3528534	0	0	0,35285337	0,35285337	0,35285337	-0,3528534	0	0	-0,3528534	-0,3528534
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	-0,3528534	-1	0	0,35285337	0,35285337	0,35285337	-0,3528534	0	-1	-0,3528534	-0,3528534
5	-0,6471466	0	-1	0,64714663	0,64714663	0,64714663	-0,6471466	-1	0	0,35285337	-0,6471466

A Tabela 8 apresenta a multiplicação da matriz inversa pela matriz Y com base de calculo termodinâmico dispostos na Tabela 5.

Tabela 8 – Matriz Multiplicação Y do motor MC1.

Pto.	Y*	B*
1	0	0,00
	0	35,30
	0	0,00
2	0	22,84
	35,2994	12,46
	0	0,00
5	0	0,00
	0	0,00
	0	0,00
4	0	12,46
5	0	22,84

Por fim, a Tabela 9 apresenta os valores dos custos exergeticos unitários obtidos com a multiplicação da matriz Y pelos valores de Investimento (Z) da configuração.

Tabela 9 – Custos exergéticos unitário do motor MC1.

pto	Z	k* (\$/s)
31	-0,000257148	0,00
37	-0,000106838	1,00
43	-0,0007107	0,00
49	0	2,49
55	0	2,49
61	0	0,00
73	0	0,00
85	0	0,00
97	0	0,00
109	0	2,08
121	0	45,20

4.2 Análise financeira da superestrutura

De acordo com ANEEL (2012), o valor da tarifa de compra de energia elétrica no estado de São Paulo para residências é de 0,26 (US\$/kWh)⁹. Dada a característica de negociação que envolve a venda da energia elétrica de autoprodutor, o valor de venda de energia elétrica produzida em uma unidade de cogeração foi admitida como sendo 30% inferior àquela praticada na compra.

Com bases nos custos de produção de energia elétrica e térmica das configurações, apresentam-se o na Tabela 10 o valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *Payback* (PB) de uma das doze configurações. As planilhas completas de todas as configurações estão dispostas no Anexo1.

⁹ Cotação do dólar utilizada de R\$ 2,00 (FINANCEONE, 2012)

Tabela 10 – Fluxo de caixa para obtenção da TIR, VPL e PB.

Análise financeira para geração de eletricidade												
	Celula 5			HyPM XR8			8,5 kW					
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72
Venda de excedente de energia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ganho com a energia térmica	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87
Custo de Produção da planta	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77
Compra de energia faltante												
Lucro Bruto	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
Imposto de Renda (34%)	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Lucro Líquido	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Investimento	-12,52											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros (BNDS)	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(12,52)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	1,3	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Depreciação & Obsolescência	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
NOPAT w/o depreciação	0,2	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33
TOTAL Fluxo de caixa	(12,27)	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33

Valor Presente Líquido - (VPL)	1,10
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	15%
Discounted Payback (years)	5,0

O cálculo de TIR, VPL e PB só é possível quando há a construção de um fluxo de caixa distribuídos em doze meses. Neste fluxo de caixa são consideradas todas as receitas com a possível venda da energia elétrica ou apenas computam-se os ganhos obtidos pela produção da energia em custos menores aos oferecidos pela rede concessionária.

As despesas com a operação, com a compra de insumos e com a manutenção também são lançadas, bem como os juros cobrados pelo banco que financiará o projeto, bem como a porcentagem de impostos incididos nas transações. Há a necessidade de imputar todos os valores de investimento inicial do projeto, como a compra de equipamentos e instalações em geral. Para a compilação dos dados e obtenção dos resultados finais, utilizou-se o Excel®.

4.3 Otimização

Os procedimentos de otimização se constituem de formulações que conduzem a solução de um problema físico qualquer a valores extremos – máximos ou mínimos, de acordo com os objetivos perseguidos – de uma maneira rápida, segura e coerente; aos modelos de otimização contrapõe-se a pesquisa por tentativa e erro, a qual – não alicerçada em teorema que assegure a eliminação de caminhos pouco prováveis de alcançar os melhores resultados – conduz a busca a uma procura exaustiva na medida do esforço dispensado e nem

sempre com uma linha de ação pré-definida para a variação dos parâmetros envolvidos (BALESTIERI, 2001).

Para a obtenção dos resultados desenvolveu-se a modelagem de otimização com o emprego do software LINGO 10.0 (LINGO, 2010), que pesquisa soluções ótimas para problemas de otimização linear, não linear e inteira.

4.3.1 Dados e variáveis

Os cálculos de otimização levam em consideração as flutuações de consumo que ocorrem em um condomínio residencial ao longo de suas 24 horas, porém como o consumo é modificado devido à sazonalidade anual, admitiu-se analisar dois períodos verão e inverno.

Para calcular a variação de entrega dos produtos em seus devidos momentos, há a necessidade de mapear o consumo de energia elétrica e térmica necessária como seguem nas Figuras 22 e 23 respectivamente. Com base nestes dados, serão determinados os pontos ótimos de trabalho desta configuração, permitindo assim verificar qual será o equipamento mais eficiente que deverá compor a configuração e também determinar como estes deverão ser operados para se obter a maior receita para o condomínio em estudo.

Ainda na Figura 22 pode-se observar que há um pico de consumo de energia elétrica ao longo das primeiras horas do dia (madrugada) no verão, este consumo se dá devido à utilização de ar condicionado presente em todas as unidades de apartamentos.

A Figura 23 refere-se ao consumo de água quente e assim como na Figura 22 pode-se observar que há um pico de consumo de água quente nas últimas horas do dia, este consumo se dá devido à utilização dos chuveiros uma vez que este condomínio tem a sua maioria de moradores como sendo estudantes universitários que estudam no período noturno.

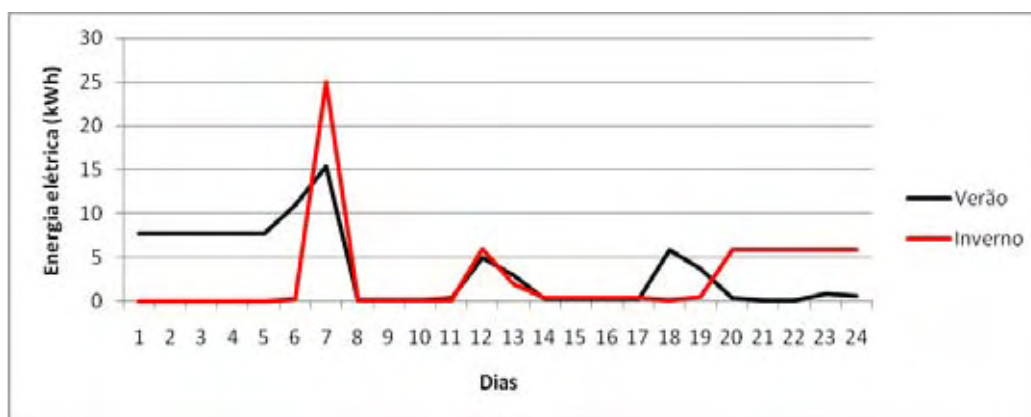


Figura 22 – Curva de consumo de energia elétrica

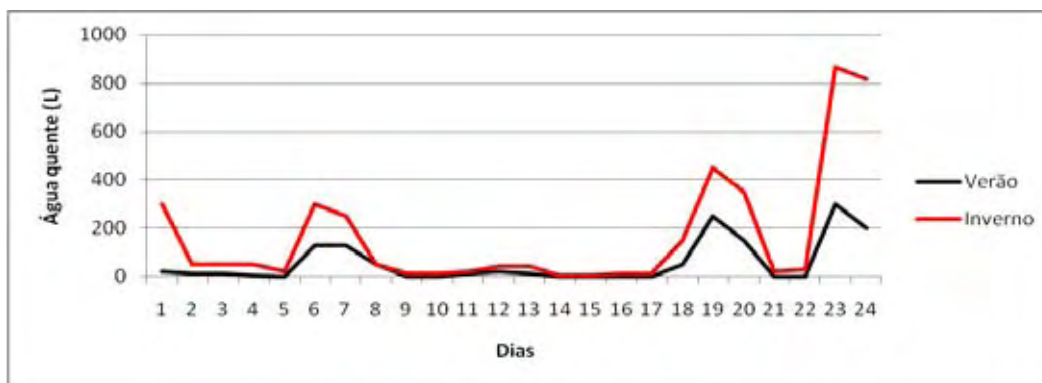


Figura 23 – Curva de consumo de água quente

Os custos dos insumos envolvidos na configuração são computados e seu consumo deve seguir o perfil de variação de utilização do condomínio. Os custos envolvidos estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Custos dos insumos

INSUMO	CUSTO ESPECÍFICO
Gás Natural ¹⁰	0,19 (US\$/kWh)
Diesel ¹¹	0,59 (US\$/kWh)
Metanol ¹²	0,79 (US\$/kWh)
Hidrogênio ¹³	3,68 (US\$/kWh)
Água ¹⁴	0,0038 (US\$/m ³)

4.3.2 Função objetivo

As análises referentes à otimização da geração de energia por meio de sistemas de cogeração devem contemplar as flutuações de consumo diárias e sazonais (em especial, inverno e verão) a fim de se conseguir identificar a configuração mais adequada para a operação nas condições mais adversas. Dessa forma, a função objetivo, expressa sob a equação (42), visa obter o ponto ótimo de trabalho para a minimização dos custos referentes ao investimento na compra dos equipamentos, consumo de combustível, o consumo de água, custo da produção da energia elétrica, custo de manutenção dos equipamentos e consumo da

¹⁰ Tarifa do Gás Natural no estado de São Paulo (COMGAS, 2012).

¹¹ Valor do diesel praticada no mercado nacional (PRECODOSCOMBUSTIVEIS, 2012).

¹² Valor do Metanol praticado por distribuidores específicos no mercado nacional (MAXIQUIM, 2012).

¹³ Valor do Hidrogênio praticado por distribuidores específicos no mercado nacional (AIR PRODUCTS, 2012).

¹⁴ Tarifa da água no estado de São Paulo (SABESP, 2012).

energia disponibilizada pela concessionária, além de maximizar a venda do excedente da produção à concessionária.

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{j=1}^{48} \sum_{i=1}^6 [& Y_{MCI,i} \cdot (Z_{MCI} + C_{MCI,comb} \cdot X_{MCI,comb,j} + C_{m_{MCI}} \cdot Pot_{i,j} + C_{\acute{a}gua} \cdot X_{MCI,\acute{a}guaquente,j}) + \\ & + Y_{FC,i} \cdot (Z_{FC} + C_{FC,comb} \cdot X_{FC,comb,j} + C_{m_{FC}} \cdot Pot_{i,j} + C_{\acute{a}gua} \cdot X_{FC,\acute{a}guaquente,j})] + \\ & + \sum_{j=1}^{48} X_{WC} \cdot C_{WC} - \sum_{j=1}^{48} X_{WV} \cdot C_{WC} \end{aligned} \quad (42)$$

na qual “i” varia de 1 a 6 referente aos 6 equipamentos geradores e “j” varia de 1 a 48 (sendo 24 horas correspondentes a um dia típico de verão e 24 horas correspondentes a um dia típico de inverno).

4.3.3 Restrições

Os doze equipamentos utilizados como acionadores (eletricidade e água quente), bem como os reservatórios térmico e elétrico, são modelados de tal forma que o despacho de carga multitemporal identifique as melhores alternativas para o atendimento das necessidades elétrica e térmica do condomínio, contemplando o armazenamento energético e a possibilidade de compra e venda de eletricidade.

As equações (43) e (44) dizem respeito à decisão de qual equipamento vai compor a versão final com base nas potências dos equipamentos e suas variações de entrega de energia elétrica, considerando a possível falta e ou excedente de energia elétrica, além de seu armazenamento na bateria (BAT) de acordo com a demanda de consumo do condomínio em todos os instantes monitorados (DW).

$$\sum_{j=1}^{48} \left(\sum_{i=1}^6 (Y_{MCI,i} \cdot pot_{MCI,i,j} + Y_{FC,i} \cdot Pot_{FC,i,j}) + X_{WC_j} - X_{WV_j} - DW_j - BAT_j \right) = 0 \quad (43)$$

$$\sum_{j=1}^{48} (Y_{MCI,j} \cdot X_{MCI,\acute{a}guaquentej} + Y_{FC,j} \cdot X_{FC,\acute{a}guaquentej} - RES_j - DAQ_j) = 0 \quad (44)$$

A equação 45 diz respeito ao balanço energético referente à produção de água quente e seu devido armazenamento no reservatório (RES) de acordo com a demanda de consumo do condomínio (DAQ). As equações (45) a (47) dizem respeito aos limites de reserva das energias térmicas e elétricas.

$$AQ_{MCI} + AQ_{FC} = RES_j + DAQ_j \quad (45)$$

$$BAT_j \geq DW_j \quad (46)$$

$$RES_j \geq DAQ_j \quad (47)$$

O conjunto de equações compreendidas entre (48) e (61) dizem respeito aos limites de produção das energias, térmica (AQ_{MCI} , AQ_{FC} , X_{aqmci} , X_{aqfc}) e elétrica (Pot_{MCI} , Pot_{FC} , X_{pelmci} , X_{pelfc}), além das energias que poderão ser comercializadas (XWC , XWV). Dadas as características tecnológicas dos equipamentos propostos na superestrutura, assumiram-se por limites referentes à operação do motor de combustão a faixa usual entre 25% e 95% da carga nominal, e para as células-combustível a faixa entre 10% e 99%.

$$XWV_j \geq 0 \quad (48)$$

$$Pot_{FCi,j} \geq 0 \quad (49)$$

$$Pot_{MCIi,j} \geq 0 \quad (50)$$

$$XWC_j \geq 0 \quad (51)$$

$$AQ_{MCIi,j} \geq 0 \quad (52)$$

$$AQ_{FCi,j} \geq 0 \quad (53)$$

$$Pot_{MCIi,j} \geq 0,25.X_{pelm,i} \quad (54)$$

$$Pot_{MCIi,j} \leq 0,95.X_{pelm,i} \quad (55)$$

$$Pot_{FCi,j} \geq 0,1.X_{pelf,i} \quad (56)$$

$$Pot_{FCi,j} \leq 0,99.X_{pelf,i} \quad (57)$$

$$AQ_{MCIi,j} \geq 0,25.X_{aqm,i} \quad (58)$$

$$AQ_{MCIi,j} \leq 0,95.X_{aqm,i} \quad (59)$$

$$AQ_{FCi,j} \geq 0,1.X_{aqf,i} \quad (60)$$

$$AQ_{FCi,j} \leq 0,99.X_{aqf,i} \quad (61)$$

O conjunto de equações compreendido de (62) e (69) diz respeito aos limites de consumo de combustível seguindo as mesmas limitações dos equipamentos demonstrados nas equações anteriores.

$$Gn_{i,j} \geq 0,25.Xgn_j \quad (62)$$

$$DI_{i,j} \geq 0,25.Xdi_j \quad (63)$$

$$Gn_{i,j} \leq 0,95.Xgn_j \quad (64)$$

$$DI_{i,j} \leq 0,95.Xdi_j \quad (65)$$

$$Mt_{i,j} \geq 0,1.Xmt_j \quad (66)$$

$$H2_{i,j} \geq 0,1.Xh2_j \quad (67)$$

$$Mt_{i,j} \leq 0,99.Xmt_j \quad (68)$$

$$H2_{i,j} \leq 0,99.Xh2_j \quad (69)$$

As equações (70) a (71) dizem respeito aos limites de consumo de água pelos motores a combustão interna seguindo as mesmas limitações dos equipamentos demonstrados nas equações anteriores.

$$A_{i,j} \geq 0,25.Xa_j \quad (70)$$

$$A_{i,j} \leq 0,95.Xa_j \quad (71)$$

5 RESULTADOS

O resultado da multiplicação da matriz inversa com os valores de investimentos totais com a compra dos equipamentos demonstrados através da Tabela 9 no capítulo 4.1.6 culminam nos custos exergoeconômicos da superestrutura, como seguem na Tabela 12.

Tabela 12 – Custos dos produtos da central de cogeração.

EQUIPAMENTOS		ENERGIA ELÉTRICA (US\$/kWh)	ENERGIA TÉRMICA (US\$/kWh)
MCI	1 CP5VB - SN (P) J	0,14	1,11
	2 CP10VB1	0,16	1,41
	3 CP25VB2	0,22	2,34
	4 GL 7000	0,16	1,18
	5 GL 11000	0,17	1,46
	6 SQ - 33	0,22	2,41
FC	1 EFOY PRO series	0,19	0,86
	2 EFOY PRO series	0,25	0,97
	3 EFOY PRO series	0,47	1,34
	4 HyPM XR4	0,18	0,84
	5 HyPM XR8	0,22	0,92
	6 HyPM XR12	0,27	0,99

Os valores dos custos dos produtos apresentados na Tabela 12 permitem que se façam os cálculos de viabilidade econômica que foram demonstrados na Tabela 10.

Tabela 13- Comparação entre TIR, VPL e PB.

Equipamento		TIR	VPL (MUS\$)	PB (ano)
MCI	1 CP5VB - SN (P) J	19,99%	2,7	4,0
	2 CP10VB1	43,19%	12,3	2,0
	3 CP25VB2	62,90%	27,6	1,0
	4 GL 7000	-11,59%	-7,6	11,0
	5 GL 11000	-	-141,1	-
	6 SQ-33	-	-157,5	-
FC	1 EFOY PRO series	10,44%	-0,8	6,0
	2 EFOY PRO series	19,90%	4,0	4,0
	3 EFOY PRO series	30,50%	17,7	3,0
	4 HyPM XR4	-	-9,9	-
	5 HyPM XR8	15,00%	1,1	5,0
	6 HyPM XR12	-	-57,3	-

Através da aplicação do conjunto de equações apresentados neste capítulo em um modelo de otimização, obtêm-se como resultado a seleção da FC 5 (Modelo HyPM XR8) como é demonstrada na Figura 24.

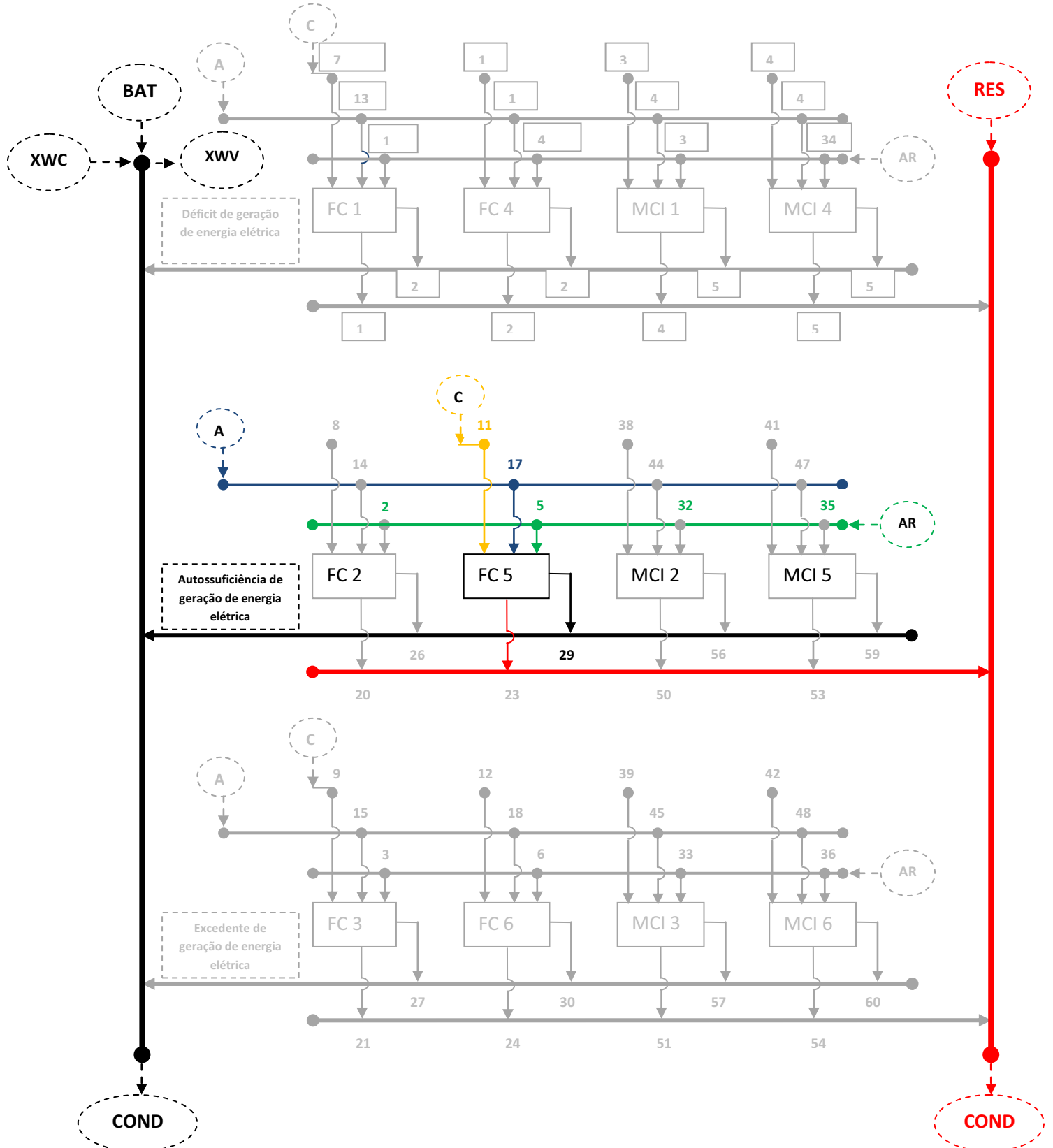


Figura 24 – Superestrutura com a seleção do equipamento gerador

Os principais pontos que culminaram na decisão em selecionar este equipamento, o tornando atrativo, referem-se à sua eficiência exergetica e ao baixo custo da exergia unitária dos fluxos que a compõem, apesar de apresentar um *payback* de cinco anos.

Através da Figura 25 pode-se observar que a FC-5 é posta a operar nas primeiras horas da manhã, de tal modo a alimentar a bateria e ao se observar o pico de consumo de energia elétrica ao longo das primeiras horas do dia (madrugada) no verão, a superestrutura utiliza energia da célula-combustível em sua capacidade máxima da bateria; uma vez que nas horas seguintes há uma queda significativa no consumo elétrico, o modelo de otimização sugere operar a célula-combustível para alimentar a bateria em alguns momentos e fazer a compra de energia em outros momentos em que a demanda excede a produção de modo a sempre atender ao consumo elétrico.

Esta parametrização do sistema permite a utilização otimizada da energia primária, ligando e desligando a geração de energia nos momentos de baixa demanda. Observa-se que não houve sugestão de venda de energia elétrica em qualquer momento da modelagem multitemporal.

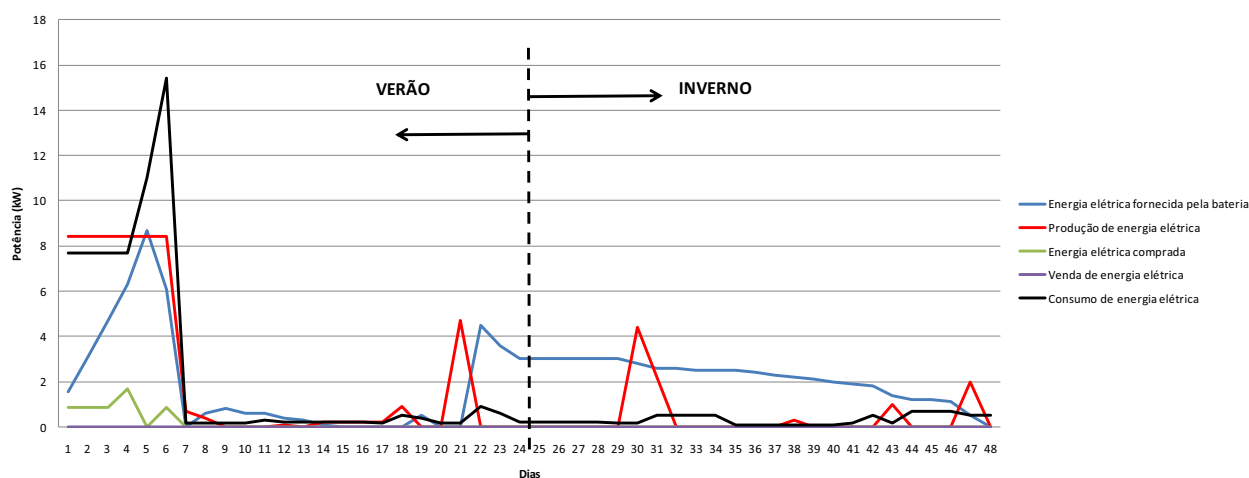


Figura 25 – Consumo de energia elétrica do condomínio residencial em dois períodos distintos (verão e inverno).

A Figura 26 refere-se ao consumo de água quente e assim como na Figura 25, pode-se observar que há um pico de consumo de água quente nas últimas horas do dia; este consumo ocorre devido à utilização dos chuveiros elétricos, uma vez que este condomínio tem como moradores, em sua maioria, estudantes universitários que estudam no período noturno. De forma similar ao que ocorreu no suprimento de energia elétrica, o reservatório é

posto a operar de forma articulada com a produção de água quente pela célula-combustível FC-5 e em conjunto suprimem o consumo de água quente do condomínio.

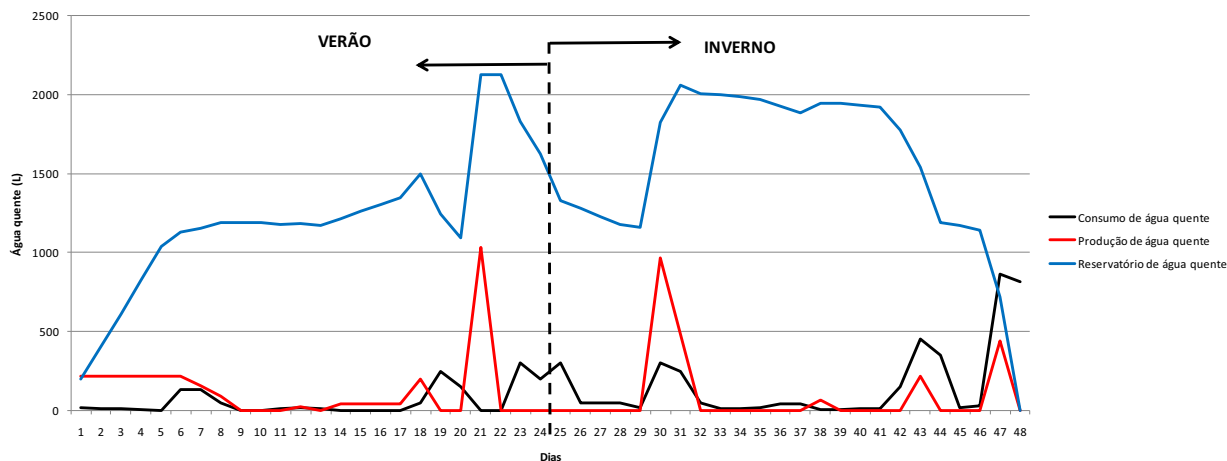


Figura 26 – Consumo de água quente do condomínio residencial em dois períodos distintos (verão e inverno).

Os principais pontos que revelaram ser mais vantajosa a utilização da célula-combustível comparativamente aos motores foram:

- Alta eficiência na produção de energia elétrica e térmica (14% superior aos MCIs);
- Regime de trabalho, pelo qual se faz o desligamento do equipamento quando seus reservatórios e baterias, tanto de água quente quanto de energia elétrica, estão cheios ou com carga total. Os reservatórios e baterias permitem que haja uma melhor utilização da fonte primária de energia;
- Flexibilidade de geração de energia térmica e elétrica em carga parcial;

Embora não avaliado, há que se destacar nas células-combustível o nível de ruído inferior aos motores de combustão interna e sem a emissão de gases provenientes da queima de combustíveis. Porém, devido ao fato de a célula-combustível fazer parte de uma tecnologia ainda em desenvolvimento, os custos de aquisição e manutenção ainda não são atrativos, além de difícil mão de obra em caso de reparos necessários. Outra questão que há de ser considerada fica por conta da segurança de manipulação e armazenamento dos combustíveis necessários para a operação da célula-combustível.

Um dos principais obstáculos para o estabelecimento da infraestrutura para a tecnologia do hidrogênio fica por conta da questão da segurança, pelos seguintes motivos: o hidrogênio apresenta sua menor densidade no estado gasoso e seu ponto de ebulição é muito baixo, fazendo com que se tenham dificuldades para armazená-lo no estado gasoso ou

líquido. Quando em forma de gás, necessita de um sistema de armazenamento de grande volume e pressão, e quando no estado líquido faz-se necessário que o seu armazenamento utilize sistemas criogênicos, ou seja, em baixíssima temperatura (-253°C) (NETO, 2013).

Para aplicações práticas, o hidrogênio pode ser armazenado em alta pressão, no estado líquido em contêineres criogênicos, ou quimicamente ligados a certos metais (hidretos metálicos). O volume e o peso dos sistemas estão cada vez mais próximos quando comparados ao armazenamento de gasolina, metanol, etanol, gás natural e baterias convencionais, cada um contendo a mesma quantidade de energia.

Existem atualmente cinco meios principais de se armazenar o hidrogênio (NETO, 2013):

- Reservatórios de gás hidrogênio comprimido;
- Reservatórios para hidrogênio líquido;
- Hidretos metálicos;
- Absorção de carbono;
- Micro-esferas.

Uma das mais pesquisadas no Brasil é através de hidretos metálicos, no qual o hidrogênio é absorvido por metais. Esta tecnologia vem sendo pesquisada pelo Laboratório de Hidrogênio do COPPE/UFRJ. O instituto de pesquisa do hidrogênio é uma referência da tecnologia do hidrogênio no Brasil e no mundo, e vem pesquisando o armazenamento do combustível em hidretos metálicos com apoio da Renault, CNPq e FAPERJ (NETO, 2013). Com isso há a possibilidade de uso destas novas tecnologias de armazenamento por condomínios residenciais, tendo apenas o custo inicial para aquisição do equipamento.

Uma vertente que deverá ser alvo de futuros estudos é a taxa de poluição e de ruído gerado pelos equipamentos geradores, considerando as regras de emissão do CONAMA e trazer uma questão de sustentabilidade deste projeto agregando custo em seus fluxos.

Por se tratar de um sistema cujo gerador de energia é uma célula-combustível a hidrogênio, incomum no mercado nacional, os custos dos produtos finais ficaram muito próximos aos valores praticados pelas concessionárias de energia elétrica nacional.

Os custos envolvidos no projeto da célula-combustível podem melhorar com o desenvolvimento futuro destes equipamentos a fim de utilizarem como combustível o etanol. Com esse desenvolvimento os custos de aquisição dos equipamentos de armazenagem podem cair significativamente e tornar o projeto mais viável.

6 DISCUSSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolveu-se nesta tese a aplicabilidade de metodologias a fim de se obter a melhor configuração de equipamentos comerciais para atendimento dos custos exegoeconômicos e de viabilidade econômica, tornando um condomínio residencial um microgerador de energia, e desta forma podendo se utilizar dos benefícios hoje disponibilizados através das novas regras estipuladas pelos órgãos governamentais.

Considerou-se para o estudo de caso, um condomínio residencial constituído basicamente por trinta apartamentos compostos, em média, por um morador em cada unidade. As necessidades energéticas deste condomínio se resumem às demandas de energia elétrica e água quente, que são consumidos a todo instante e em todos os dias do ano de forma simultânea. Para atendimento destas demandas, estipulou-se uma superestrutura composta de equipamentos geradores de energia e de reservatórios a fim de possibilitar o atendimento ininterrupto em todos os instantes.

A composição da superestrutura realizou-se com base em equipamentos selecionados em catálogos comerciais considerando suas capacidades de produção de energias (térmica e elétrica), formado por seis equipamentos geradores de uma tecnologia consagrada no mercado nacional (motor de combustão interna) e seis equipamentos geradores de uma tecnologia emergente e ainda muito pouco explorada no mercado nacional (célula-combustível).

Com base na metodologia apresentada no Capítulo 3, a obtenção dos valores de dimensionamento da configuração segue um crivo de decisões, partindo primeiramente pela análise técnica e passando então para a análise econômica. A Figura 27 demonstra as etapas necessárias para a seleção correta de um equipamento, ilustrando o aprofundamento normalmente adotado nesse tipo de projeto; de uma maneira geral, as restrições econômicas dizem respeito à disponibilidade de capital para investimento, taxas de juros praticados, prazos para apreciação dos bens imóveis e, dessa forma, a maior ou menor atratividade de um projeto em comparação com os demais bem como com outras formas de investimento do mercado de capitais.

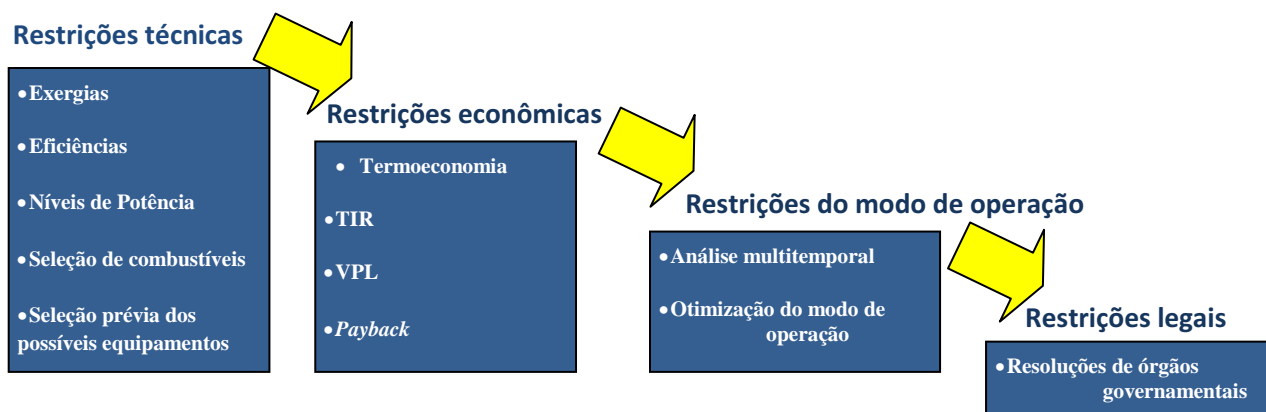


Figura 27 – Níveis de profundidade dos estudos de viabilidade.

O método utilizado para avaliar os custos envolvidos na superestrutura foi a Teoria do Custo Exergético, que de forma matricial busca obter os resultados exergoeconômicos de cada passagem da superestrutura, exigindo necessariamente o levantamento minucioso de parâmetros termodinâmicos de todos os componentes envolvidos. A utilização deste método trouxe ao estudo em questão confiabilidade nos valores obtidos através do rigor da técnica.

Percebe-se, com a aplicação da teoria do custo exergético, que as células-combustível entregam a energia elétrica com custo maior que a energia gerada pelos conjuntos baseados em motores de combustão interna. Alguns pontos específicos devem ser considerados nesta análise que se referem justamente ao combustível utilizado, o quão eficiente é o conjunto de geração e o quão flexível é a forma de operação, pois a energia entregue pelos conjuntos geradores tem seus custos unitários relacionados diretamente com o custo da energia primária utilizada e seus custos exergéticos unitários.

As células-combustível que utilizam o metanol ou hidrogênio como fonte primária de energia tem o custo de seus produtos algo próximo de 27% mais altos do que os apresentados pelos motores a combustão interna que se utilizam do diesel ou gás natural. Quando se avalia a produção de energia térmica (água quente), o inverso ocorre, ou seja, o conjunto de células-combustível produz água quente a um custo 37% menor que os motores a combustão interna.

O projeto de instalação de uma central de cogeração em um condomínio residencial, como em qualquer empreendimento comercial, deve ser comprovado através de métodos econômicos conhecidos, como a taxa interna de retorno e o valor presente líquido, de modo a avaliar se os ganhos potenciais com a sua instalação irão se concretizar em determinado prazo. A aplicabilidade destes métodos está prevista na nota técnica N° 235/2006 –

SER/ANEEL descrita no capítulo III, que trata da metodologia para implantação da revisão tarifária periódica (ANEEL, 2006).

A análise de taxa interna de retorno, valor presente líquido e tempo de retorno têm como base para cálculo o investimento realizado com:

- A compra dos equipamentos;
- Os custos com a instalação dos equipamentos;
- Ganhos com a produção da água quente – neste ponto é preciso considerar o valor da água quente produzida pela central de microcogeração em comparação ao custo da energia elétrica, hoje contratada da concessionária, utilizada para estes fins.
- Comercialização da energia elétrica em forma de compensação, conforme estabelece a resolução normativa N° 517 da ANEEL;
- Custo operacional e de manutenção da planta de microcogeração;
- Em caso da falta de energia produzida pela planta de microcogeração, considera-se a compra deste montante a concessionária.

Aplicando as premissas acima listadas foram obtidos os valores dispostos através da Tabela 13, na qual se observa uma vantagem na seleção dos motores a combustão interna. Porém, apenas tomando tais valores por base, pode-se incorrer em erros escolhendo uma configuração eficiente para uma determinada condição, porém não a mais atrativa para a operação ao longo do tempo considerando-se as condições mais críticas de demanda de energia.

Em um mundo globalizado de competição acirrada, tornar-se mais produtivo é um tema muito utilizado e, ao falar em produtividade, inevitavelmente devem-se salientar conceitos mais amplos de eficiência e eficácia. Desse modo, a eficiência leva em consideração o quão bem se produz e a eficácia o quão bem se escolhe a configuração e de que forma a mesma entrega seus resultados (KRIESER, 2009). Assim, busca-se apurar melhor os resultados obtidos através da metodologia aplicada até este momento.

Faz-se necessário uma análise mais apurada dos resultados obtidos pela teoria do custo exergéticos, pelos métodos da taxa interna de retorno, valor presente líquido e tempo de retorno através da otimização, da forma em que a planta deverá operar ao longo das 24 horas de um dia levando em consideração a flutuação de consumo do condomínio.

O principal objetivo do conjunto de equações, entre função objetivo e restrições, é minimizar todos os custos envolvidos na produção de energia elétrica e água quente,

maximizando os resultados de produção. Com isso, busca-se selecionar um único elemento gerador de energia para compor a configuração da microcentral de cogeração.

Ao contrário da análise financeira, a escolha do equipamento gerador foi uma célula-combustível que utiliza com fonte primária de energia o hidrogênio. Os pontos que levaram a esta decisão foram a sua alta eficiência de produção aliado a um combustível, mesmo que custoso, com alto valor calorífico, compensando assim o consumo final.

Uma das premissas dos cálculos de otimização é seguir a flutuação de consumo das energias necessárias, e para este ponto a flexibilidade de operação da célula-combustível foi ponto preponderante para a tomada de decisão. Neste estudo não foram consideradas as condições ambientais que poderiam acrescentar valores que deixassem ainda mais vantajosa a decisão de investir em uma tecnologia mais limpa como as de célula-combustível.

Este resultado final chama atenção de quão importante é a atuação dos órgãos governamentais para a viabilização de um projeto de descentralização de energia e da inserção da microgeração de energia destinada a condomínios residenciais. A flexibilidade criada pela recente resolução N^o 517/2012 da ANEEL, caso sejam estabelecidas políticas públicas que incentivem a geração distribuída por parte de agentes do mercado, deverá permitir a instalação de conjuntos microgeradores em diversas iniciativas do setor comercial e residencial.

Há oportunidades de trabalhos futuros, tais como modelar o equacionamento de otimização considerando o ruído gerado pelos equipamentos geradores visando sua minimização. Ainda no âmbito ambiental, podem-se atribuir valores, nas matrizes do modelo utilizado para o cálculo dos custos exergéticos, penalizando a geração de CO₂ e particulados.

7. CONCLUSÃO

A tomada de decisão em se investir em um projeto de implantação de uma micro central de cogeração destinada a um condomínio residencial tem que passar por crivos decisórios para se obter a melhor decisão e com isso melhorar a performance e o lucro com sua operação.

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise para avaliar a elegibilidade econômica de alternativas de minigeração comparadas de forma competitiva, utilizando métodos que permitiram avaliar o custo exergoeconômico das mesmas, bem como os custos econômico-financeiros tradicionais e a busca da melhor alternativa para o despacho econômico das alternativas estudadas em base multi-temporal. O estudo foi desenvolvido visando contribuir para solução do problema da microcogeração estabelecido nas resoluções da ANEEL e RTQ-R do INMETRO.

Por se tratar de um sistema de cogeração de energia *bottoming* no qual a geração da energia térmica tem que ser atendida em primeiro plano, as células-combustível se revelaram mais adequadas a compor a superestrutura devido a água quente ser inerente ao seu processo de geração. Outra vantagem para a seleção das células-combustível referem-se ao nível de eficiência de geração das energias térmica e elétrica, que são 15% melhores ao se comparadas com os motores à combustão interna.

É possível se trabalhar em carga parcial com os dois tipos de tecnologias, porém há a necessidade de se ter pelo menos 25% de carga motriz para o funcionamento do motor a combustão interna, o que não acontece com as células-combustível, que podem gerar energia com apenas 10% do fluxo de combustível. Esta característica é essencial quando há a necessidade de trabalhar em carga parcial devido ao despacho que carga necessário.

O armazenamento de combustível é outro ponto preponderante na decisão de qual equipamento escolher. Este quesito em específico penaliza a seleção das células-combustível, uma vez que a utilização do hidrogênio e do metanol exigem equipamentos específicos e cuidados no manuseio.

De maneira geral, as restrições econômicas dizem respeito à disponibilidade de capital para investimento, taxas de juros praticados, prazos para apreciação dos bens imóveis e, dessa forma, a maior ou menor atratividade de um projeto em comparação com os demais bem como com outras formas de investimento do mercado de capitais.

Os resultados mostram que há uma vantagem aos motores a combustão interna, muito devido ao seu baixo custo de investimento e baixos custos operacionais, comparados às células-combustível.

No entanto, a partir de tais informações é possível se tomar a decisão errada de qual equipamento gerador deverá compor a configuração final da central de microgeração. Somente com base no retorno de investimento e de qual taxa de retorno é a mais vantajosa, dado os valores dos juros cobrados pelas instituições bancárias e pelo tempo de retorno do investimento inicial, não é possível dizer que os motores a combustão interna são os mais vantajosos. Esta afirmação se concretiza quando há a análise de otimização, que minimiza todos os custos envolvidos no projeto, desde a aquisição dos equipamentos até a vazão final dos produtos.

A análise de otimização para despacho de carga multitemporal revelou ser mais vantajosa a seleção da célula-combustível para as condições propostas no estudo de caso, com tal equipamento operando em carga parcial parte do tempo, chegando a estar desligada em outros instantes, economizando combustível. A célula-combustível permite tal flexibilidade, ao ser comparada aos motores que são mais rígidos neste sentido.

Outro ponto que culmina na escolha da célula-combustível é a sua melhor eficiência ao se comparado com os motores a combustão interna, aproveitando melhor a fonte primária de energia, baixando os custos finais dos produtos gerados.

Com as novas regras estipuladas pela ANEEL através da resolução N.517, além de ser possível a instalação uma planta de microgeração em uma unidade destinada a fins residenciais, do ponto de vista das restrições legais é possível se obter vantagens e ganhos com sua instalação.

A possibilidade de conexão dos microgeradores à rede de energia elétrica e a sua comercialização, mesmo que por meio de compensação, permite vantagens podendo flexibilizar o modo de operação da planta de microgeração.

É previsto também ganhos quanto à geração de energia com a aplicação de novas tecnologias e fontes limpas, segundo o programa de etiquetagem do INMETRO, tornando mais vantajosa a utilização das células-combustível como elemento gerador de energia para fins de elevação de nível de classificação.

8 REFERÊNCIAS

ABRACEEL. **O que é o Mercado Livre**. Disponível em: <<http://www.abraceel.com.br/paginas/detalhes/3096/o-que-e-o-mercado-livre>> acesso em: 08/02/2013.

ACCADIA, M., SASSO, M., SIBILINO, S., VANOLI, L., Micro-combined heat power in residential and light commercial applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, p. 1247-1259, 2003.

AIR PRODUCTS. **Solicitação de orçamento** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <fabricioc@santher.com.br> em 22 nov. 2012.

ALANNE, K., SALO, A., SAARI, A., GUSTAFSSON, S. Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems. **Energy and Buildings**, v.39, p. 1218-1226, 2007.

ALEMANHA. Federal ministry for the environment, natural conservation and nuclear safety. **EEG- The renewable energy sources act – The successful history of sustainable policies for Germany**. Berlin, 2007. 27 p.

ANDRÉ, C. **Redução da pobreza energética urbana na América Latina**, Conselho Mundial de Energia, 2008.

ANEEL, **Tarifas de fornecimento de energia elétrica**, Cadernos temáticos ANELL, 30p., 2005.

ANEEL, **Resolução Homologatória N° 1289 Publicada em 10/05/2012**. 2012a. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifaAplicada/index.cfm>>. Acesso em: 13/12/2012.

ANEEL, **Nota Técnica N° 01877/2012-SRD/ANEEL**. Análise das contribuições recebidas na Audiência Pública N° 100/2012, que obteve subsídios para alteração da Resolução Normativa N° 482/2012. 2012b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/100/resultado/nota_tecnica_0177_davi_rabelo_dir.pdf> Acesso em: 10/02/2013.

ANEEL, **Nota técnica n.067/2006-STR ANEEL de 18 de abril de 2006**, Regulamentação do processo de revisão tarifária periódica dos contratos de concessão de transmissão de energia elétrica obtidos mediante licitação. São Paulo, 2012.

ANEEL, **Nota técnica n.235/2006-STR ANEEL de 30 de agosto de 2006**, Regulamentação do processo de revisão tarifária periódica dos contratos de concessão de transmissão de energia elétrica obtidos mediante licitação, na modalidade de leilão público. São Paulo, 2012.

ANEEL, **Resolução n.235 de 14 de novembro de 2006**, Estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogedoras de energia e dá outras providências. São Paulo, 2006.

ANEEL, **Resolução n.281 de 1 de outubro de 1999**, Estabelece as condições gerais de contratação do acesso, compreendendo o uso e a conexão, aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. São Paulo, 1999.

ANEEL, **Resolução n.482 de 17 de abril de 2012**, Estabelece as condições para acesso de microgeração. São Paulo, 2012.

BALESTIERI, J.A.P. **Avaliação tecnológica e metodológica para o planejamento de centrais de cogeração**. Relatório Parcial de Atividades de Pós-Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BARJA, G. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. 157 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2006.

BEAUSOLEIL-MORISSON, I., LOMBARDI, K. The calibration of a model for simulating the thermal and electrical performance of a 2.8 kW AC solid-oxide fuel cell micro-cogeneration device. **Journal of Power Sources**, v. 186 (1), p. 67-79, 2009.

BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAN, M. **Thermal design and optimization**. John Wiley, N.Y, 1996. APUD BALESTIERI, J.A.P. Avaliação tecnológica e metodológica para o planejamento de centrais de cogeração. Relatório Parcial de Atividades de Pós-Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BRASIL. Decreto n.2003, de 10 de setembro de 2006, **Coleção de Leis do Brasil**, Distrito Federal, 2006.

BRASIL. Lei n.9648, 27 de maio de 1998, **Coleção de Leis do Brasil**, Distrito Federal, 1998.

BRASIL. **Manual de aplicação dos regulamentos RTQ-C e RAC-C**. Volume 4. 2010. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/data/Pages/LUMIS0389BBA8PTBRIE.htm>>. Acesso em: 10/12/2012.

CERQUEIRA, S.A.A.G., NEBRA, S. A. **Cost attribution methodologies in cogeneration systems**. Energy Conversion and Management, v. 40, n. 15–16, 1999, p.1587–1597.

COMGÁS. Tarifas do Gás Natural canalizado disponível em: <<http://www.comgas.com.br/tarifas.asp>> acesso em 10/12/2012.

CRISTALDO, M., ORTEGA, E. **Análise econômico-financeira da utilização do gás natural em sistemas de cogeração aplicados a instalações prediais comerciais e residenciais**. II seminário internacional, Reestruturação e regulação do setor de energia elétrica a gás natural, UFRJ, 2007.

DORER, V., WEBER, A. Energy and CO₂ emissions performance assessment of residential micro-cogeneration systems with dynamic whole-building simulation programs. **Energy Conversion and Management**, v.50, p. 648-657, 2009.

DORER, V., WEBER, R., WEBER, A. Performance assessment of fuel cell micro-cogeneration systems for residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 37 (11 SPEC. ISS.), p. 1132-1146, 2005.

ELETROBRÁS, PROCEL, **Conservação de energia**, Itajubá, Editora da EFEI, 2001.

FINANCEONE. **Cotação do dólar** disponível em: <<http://www.financeone.com.br/moedas/cotacoes-do-dolar>> acesso em 10/12/2012.

GOLDBARG, M., LUNA H. **Otimização Combinatória e Programação Linear**, Rio de Janeiro, Editora Campus, 2000.

INMETRO, **Lançamento do Programa de Etiquetagem de Edifícios Residenciais. São Paulo. 2012.** Disponível em: <http://www.INMETRO.gov.br/noticias/verNoticia.asp?seq_noticia=3151> acesso em 10/01/2012.

ITO, K., YOKOYAMA, R., SHIBA, T. Optimal Operation of a Diesel Cogeneration Plant Including a heat Storage Tank. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 114, p.687-694, oct.1992.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. London, Butter Worths, 1985.

KRIESER, P. **A diferença entre eficiência e eficácia** disponível em: <<http://www.baguete.com.br/columnistas/colunas/51/paulo-krieser/29/01/2009/a-diferenca-entre-eficiencia-e-eficacia>> acesso em 09/02/2013.

LINGO. **The modeling language and optimizer – user’s manual**. Chicago, USA: LINDO Systems, 2010.

LOZANO, A., RAMOS, J., CARVALHO, M., SERRA, L. Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings. **Energy and Buildings**, v.41, p. 1063-1075, 2009.

LOZANO, A., SARAIVA, J. Optimal Cogeneration Technology Selection for Residential and Commercial Buildings. **Cogeneration and distributed Generation Journal**, v.25, n.4, p.8-19, 2010.

LOZANO, M.A., VALERO, A. Thermoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems. **ASME Thermodynamics, Design, Analysis and Improvement of Energy Systems**, p. 311-320, 1993.

MATSUDO, E. **A reestruturação setorial e os reflexos sobre o planejamento e os estudos de mercado das distribuidoras de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Energia) – Escola politécnica, São Paulo, 2001.

MAXIQUIM, **Preço do metanol no Brasil** disponível em: < http://www.maxiquim.com.br/site/blog_ver.php?id=198 > acesso em 10/12/2012.

NETO, EMILIO H. **Armazenamento de hidrogênio**, São Paulo disponível em : < http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html> acesso em 14/01/2013.

NOTTROT, A., KLEISSL, J., WASHOM, B. Energy dispatch schedule optimization and cost benefit analysis for grid-connected, photovoltaic-battery storage systems. **Renewable Energy**, v. 55, p. 230-240, 2013.

ONOVWIONA, H.I., ISMET UGURSAL, V., FUNG, A.S. Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 27 (5-6), pp. 848-861, 2007.

PAEPE, MICHEL, D'HERDT PETER, MERTENS, D. Micro-CHP systems residential applications. **Energy Conversion and Management**, v.47, p3435-3446, 2006.

PORTUGAL, 2007. Decreto Lei N° 36, de 2 de novembro de 2007. Disponível em: <<http://www.luxmagna.pt/legislacao/DL3632007.pdf>>. Acesso em: 10/01/2013.

PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS. **Preço dos combustíveis comercializados em Bragança Paulista** disponível em: < <http://www.precodoscombustiveis.com.br> > acesso em 10/12/2012.

REN, H., GAO, W. Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 853-861, 2010.

RICHTER, M. German utilities and distributed PV: how to overcome barriers to business model innovation. **Renewable Energy**, v. 55, p. 456-466, 2013.

RUAN, Y., LIU, Q., ZHOU, W., FIRESTONE, R., GAO, W., WATANABE, T. Optimal option of distributed generation technologies for various commercial buildings. **Energy**, v. 86, p. 1641-1653, 2009.

RUIZ-ROMERO, S., COLMENAR-SANTOS, A., GIL-ORTEGO, R., MOLINA-BONILLA, A. Distributed generation: the definite boost for renewable energy in Spain. **Renewable Energy**, v. 53, p. 354-364, 2013.

SABESP. **Tarifas e serviços** disponível em:< <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=183>> acesso em 10/12/2012.

SABESP. **Simulador de consumo de água** disponível em:
<www.sabesp.com.br/calandraweb/animacoes/index.html> acesso em 24/05/2012a.

TAKAHIRO, K. **Development strategies toward promotion and expansion of residential fuel cell micro-CHP system in Japan**. 2009. Osaka Gas Co.. Disponível em:
<www.igu.org/html/wgc2009/papers/docs/wgcFinal00801.pdf>, acesso em 03/02/2013.

TEMIR, G., BILGE, D., **Thermoeconomic analysis of a trigeneration system**
Applied Thermal Engineering, V.24, p. 2689 – 2699, 2004.

VAN WYLEN, G., SONNTAG R., BORHNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**.
5.ed.Edgard Blucher, 2000.537 p.

ANEXO 1 – Análises contábeis dos produtos gerados.

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica da célula combustível 1.

Análise financeira para geração de eletricidade Celula 1 EFOY PRO series 5,5 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia												
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
Compra de energia faltante	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Lucro Bruto	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Imposto de Renda (34%)	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Lucro Líquido	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Investimento	-10,75											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(10,75)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	0,8	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Depreciação & Obsolescência	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Depreciação	(0,1)	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70
TOTAL Fluxo de caixa	(10,83)	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	-0,84
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	10%
Discounted Payback (years)	6,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica da célula combustível 2.

Análise financeira para geração de eletricidade Celula 2 EFOY PRO series 11,1 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26
Compra de energia faltante												
Lucro Bruto	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87
Imposto de Renda (34%)	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Lucro Líquido	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
Investimento	-14,05											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(14,05)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	1,9	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
Depreciação & Obsolescência	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
Depreciação	0,7	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07
TOTAL Fluxo de caixa	(13,32)	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	4,00
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	20%
Discounted Payback (years)	4,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica da célula combustível 3.

Análise financeira para geração de eletricidade Celula 3 EFOY PRO series 31,1 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	17,08	17,08	17,08	17,08	17,08	17,08	17,08	17,08	17,08	17,08	17,08	17,08
Compra de energia faltante												
Lucro Bruto	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87
Imposto de Renda (34%)	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68
Lucro Líquido	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20
Investimento	-25,85											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(25,85)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	5,2	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20
Depreciação & Obsolescência	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Depreciação	3,0	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35
TOTAL Fluxo de caixa	(22,81)	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	17,68
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	31%
Discounted Payback (years)	3,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica da célula combustível 4.

Análise financeira para geração de eletricidade Celula 4 HyPM XR4 4,5 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia												
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Compra de energia faltante	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Lucro Bruto	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)	(1,11)
Imposto de Renda (34%)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)
Lucro Líquido	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)
Investimento	-10,16											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(10,16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	(0,7)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)	(0,73)
Depreciação & Obsolescência	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Depreciação	(1,6)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
TOTAL Fluxo de caixa	(11,74)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	-9,86
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	-26%
Discounted Payback (years)	11,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica da célula combustível 5.

Análise financeira para geração de eletricidade Celula 5 HyPM XR8 8,5 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72	20,72
Venda de excedente de energia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ganho com a energia térmica	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87
Custo de Produção da planta	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77
Compra de energia faltante												
Lucro Bruto	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
Imposto de Renda (34%)	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Lucro Líquido	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Investimento	-12,52											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(12,52)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	1,3	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Depreciação & Obsolescência	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Depreciação	0,2	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33
TOTAL Fluxo de caixa	(12,27)	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	1,10
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	15%
Discounted Payback (years)	5,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica da célula combustível 6.

Análise financeira para geração de eletricidade Celula 6 HyPM XR12 12,5 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	23,54	23,54	23,54	23,54	23,54	23,54	23,54	23,54	23,54	23,54	23,54	23,54
Compra de energia faltante												
Lucro Bruto	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)	(12,37)
Imposto de Renda (34%)	(4,21)	(4,21)	(4,21)	(4,21)	(4,21)	(4,21)	(4,21)	(4,21)	(4,21)	(4,21)	(4,21)	(4,21)
Lucro Líquido	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)
Investimento	-14,88											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(14,88)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	(8,2)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)	(8,16)
Depreciação & Obsolescência	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
Depreciação	(9,4)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)
TOTAL Fluxo de caixa	(24,28)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)	(6,92)

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	-57,34
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	#NÚM!
Discounted Payback (years)	11,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica do motor de combustão interna 1.

Análise financeira para geração de eletricidade Motor 1 CP5VB - SN (P) J 5 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39
Compra de energia faltante	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Lucro Bruto	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
Imposto de Renda (34%)	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Lucro Líquido	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Investimento	-9,25											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(9,25)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	1,3	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Depreciação & Obsolescência	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Depreciação	0,5	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
TOTAL Fluxo de caixa	(8,77)	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03

Valor Presente Líquido - VPL (MUSS)	2,67
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	20%
Discounted Payback (years)	4,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica do motor de combustão interna 2.

Análise financeira para geração de eletricidade Motor 2 CP10VB1 9,9 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
Compra de energia faltante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Bruto	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54
Imposto de Renda (34%)	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Lucro Líquido	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Investimento	-10,97											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(10,97)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	3,0	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Depreciação & Obsolescência	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
Depreciação	2,1	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91
TOTAL Fluxo de caixa	(8,88)	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91

Valor Presente Líquido - VPL (MUSS)	12,30
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	43%
Discounted Payback (years)	2,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica do motor de combustão interna 3.

Análise financeira para geração de eletricidade Motor 3 CP25VB2 25 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36
Compra de energia faltante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Bruto	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07
Imposto de Renda (34%)	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08
Lucro Líquido	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99
Investimento	-16,25											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(16,25)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	6,0	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99	5,99
Depreciação & Obsolescência	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
Depreciação	4,6	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34
TOTAL Fluxo de caixa	(11,62)	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	27,59
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	63%
Discounted Payback (years)	1,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica do motor de combustão interna 4.

Análise financeira para geração de eletricidade Motor 4 GL 7000 7 kW												
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	7,67	7,67	7,67	7,67	7,67	7,67	7,67	7,67	7,67	7,67	7,67	7,67
Compra de energia faltante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Bruto	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)	(0,58)
Imposto de Renda (34%)	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,20)
Lucro Líquido	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)
Investimento	-9,95											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(9,95)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	(0,4)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)	(0,38)
Depreciação & Obsolescência	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Depreciação	(1,2)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
TOTAL Fluxo de caixa	(11,16)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	-7,60
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	-12%
Discounted Payback (years)	11,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica do motor de combustão interna 5.

Análise financeira para geração de eletricidade												
	Motor 5				GL 11000				11 kW			
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85
Compra de energia faltante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Bruto	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)	(33,80)
Imposto de Renda (34%)	(11,49)	(11,49)	(11,49)	(11,49)	(11,49)	(11,49)	(11,49)	(11,49)	(11,49)	(11,49)	(11,49)	(11,49)
Lucro Líquido	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)
Investimento	-11,35											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(11,35)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	(22,3)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)	(22,31)
Depreciação & Obsolescência	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Depreciação	(23,3)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)
TOTAL Fluxo de caixa	(34,60)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)	(21,36)

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	-141,07
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	#NÚM!
Discounted Payback (years)	11,0

Análise contábil da produção de energia elétrica e térmica do motor de combustão interna 6.

Análise financeira para geração de eletricidade												
	Motor 6				SQ - 33				25,2 kW			
	mês 1	mês 2	mês 3	mês 4	mês 5	mês 6	mês 7	mês 8	mês 9	mês 10	mês 11	mês 12
Energia Elétrica da concessionária	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Venda de excedente de energia	14,23	14,23	14,23	14,23	14,23	14,23	14,23	14,23	14,23	14,23	14,23	14,23
Ganho com a energia térmica	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Custo de Produção da planta	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84
Compra de energia faltante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Bruto	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)
Verba de Marketing												
Outras Despesas												
Obsolescência												
Lucro Operacional	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)	(37,26)
Imposto de Renda (34%)	(12,67)	(12,67)	(12,67)	(12,67)	(12,67)	(12,67)	(12,67)	(12,67)	(12,67)	(12,67)	(12,67)	(12,67)
Lucro Líquido	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)
Investimento	-16,32											
Taxa cambial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Juros	12,5%											
WACC Taxa mensal	1,04%											
FLUXO DE CAIXA												
Investimento	(16,32)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lucro Líquido	(24,6)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)	(24,59)
Depreciação & Obsolescência	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Depreciação	(26,0)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)
TOTAL Fluxo de caixa	(42,27)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)	(23,23)

Valor Presente Líquido - VPL (MUS\$)	-157,55
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	#NÚM!
Discounted Payback (years)	11,0