

Otimização Econômica do Fornecimento de Energia para um Edifício Residencial Localizado em João Pessoa-PB**FILIPPI MACIEL DE MELO**UFPB - Universidade Federal da Paraíba
filipismaciell@gmail.com**MONICA CARVALHO**Universidade Federal da Paraíba
monica.carvalho@cear.ufpb.br



OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DO FORNECIMENTO DE ENERGIA PARA UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL LOCALIZADO EM JOÃO PESSOA-PB

Resumo

Um estudo de otimização deve ser realizado sempre que houver necessidade de garantir a viabilidade econômica de um sistema de fornecimento e conversão de energia. Este trabalho realizou um estudo de otimização, utilizando-se de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) com o software Lingo, em uma edificação situada na cidade de João Pessoa. A otimização inclui não somente a configuração do sistema (equipamentos a instalar) mas também a estratégia operacional (como cada equipamento opera, ao longo do ano). Para esse estudo foram considerados aspectos econômicos, técnicos e legais, com o objetivo de minimizar os custos anuais associados ao fornecimento de energia para um edifício residencial de 20 pavimentos e 40 apartamentos. As demandas energéticas desse edifício foram calculadas pelo software Energy Plus: 83, 171 e 242 MWh/ano para calor (água quente), energia elétrica e refrigeração, respectivamente. A configuração otimizada do sistema foi tradicional: eletricidade comprada da rede elétrica atendeu diretamente a demanda de eletricidade, e por meio de uma caldeira elétrica e chiller mecânico, às demandas de calor e refrigeração. Esse resultado foi obtido devido a localização geográfica (baixa demanda de calor, impossibilitando a cogeração), e devido ao cenário econômico considerado, em especial ao alto preço da máquina de absorção, impossibilitando a trigeração.

Palavras-chave: Otimização, Lingo, Programação Linear Inteira Mista, Energia, Residencial.

Abstract

An optimization study should be carried out whenever there is the need to ensure economic viability of an energy supply and conversion system. The work presented herein carried out an optimization study, using Mixed Integer Linear Programming (MILP) with Lingo software, in a building located in the city of João Pessoa. The optimization includes not only the system configuration (equipment to install) but also the operational strategy (operation throughout the year). For this study, the economic, technical and legal aspects were considered, in order to minimize the annual costs with the energy supply of a residential building with 20 floors and 40 apartments. The energy demands were calculated by Energy Plus: 83, 171 and 242 MWh/year for heating (hot water), electricity and cooling, respectively. The optimized configuration of the system was traditional: electricity purchased from the electric grid met the electricity demands directly, and by means of an electric boiler and mechanical chiller, satisfied the heating and cooling demands. This occurred because of the geographic location (low heat demand, rendering cogeneration impossible) and of the economic scenario considered, especially the high cost of the absorption chiller, which rendered trigeneration impossible.

Keywords: Optimization, Lingo, Mixed Integer Linear Programming, Energy, Residential.



1 Introdução

A energia elétrica no Brasil é regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que tem a finalidade de fiscalizar e coordenar a produção, transmissão e comercialização dessa energia (Brasil, 2012). Em edifícios, o fornecimento de energia elétrica pode ser dado de forma convencional, com as demandas sendo atendidas exclusivamente pela concessionária, ou pode-se tirar proveito dos benefícios de se utilizar técnicas de integração energética e cogeração para o fornecimento de energia.

A integração energética é uma metodologia de projeto orientada a processos e melhoria nos sistemas de produção, efetuando uma análise termodinâmica e econômica, desde os processos individuais até a planta completa e enfatizando o uso eficiente de recursos consumidos (Serra et al., 2007). A integração energética combina as necessidades e enfatiza o processo por inteiro, considerando as interações entre processos do sistema.

As edificações das classes residencial, comercial e poder público representam grande parte da parcela do consumo de energia elétrica no Brasil, atualmente cerca de 50% (INMETRO, 2014). Grande parte dessa energia é consumida para prover conforto ambiental aos usuários (INMETRO, 2014). De acordo com Castro e Montini (2010), o consumo residencial de energia elétrica vem mostrando crescimento médio anual de 4,7%, mas aumentando em taxas maiores nos últimos anos.

O setor residencial se mostra como o segundo maior responsável pelo consumo de energia elétrica no Brasil (EPE, 2015). A International Energy Agency (2012) mencionou que a eletricidade vai ser responsável por 65% do consumo de energia nos edifícios brasileiros em 2050 (49% a mais que em 2012), devido ao aumento no consumo de eletrodomésticos e eletroportáteis e proliferação de equipamentos eletroeletrônicos. Melhorias na eficiência energética e substituição de combustíveis vão ajudar a contribuir com 47% das reduções nas emissões (IEA, 2012). Apesar da importância das edificações residenciais no setor energético, o setor da construção civil tem uma tradição pobre na análise energética e muitas vezes é bastante complicado integrar uma equipe de arquitetos e engenheiros trabalhando juntos no projeto de um edifício (Garcia, 2006). A ausência de estudos energético nas edificações pode trazer resultados insatisfatório por longo tempo se considerarmos o tempo de vida dos edifícios. Devido a esses fatores, um estudo energético nesse setor se mostra muito conveniente.

Sempre que houver a necessidade de duas ou mais formas de energias, há a possibilidade de implantação de um sistema de cogeração ou trigeração. Porém, essa implantação deve ser questionada se ela se justifica economicamente, ou qual seria a melhor forma de implantação dentre as várias possibilidades de atender essas demandas energéticas. As dificuldades encontradas na síntese de um sistema de suprimento de energia no setor residencial se concentram na variabilidade das demandas energéticas, dos preços dos recursos energéticos e das restrições legais. Essas dificuldades podem ser resolvidas através de técnicas de otimização amplamente utilizadas no setor industrial que podem ser extrapoladas para o setor residencial (Carvalho, 2011). Os processos de otimização de sistemas consistem, basicamente, em maximizar ou minimizar valores em um problema físico, auxiliando na escolha de uma configuração ótima, de forma mais rápida e menos esforços se comparada com um método de tentativa e erro.

Este trabalho apresenta um estudo de otimização para a conversão e fornecimento de energia a uma edificação residencial localizada na cidade de João Pessoa, considerando os aspectos legais, econômicos e a possibilidade de trigeração ou cogeração no seu sistema. Este trabalho insere-se num projeto mais amplo, que inclui uma dissertação de mestrado (MELO, 2017).



2 Referencial Te3rico

A cogera3o pode ser entendida como uma solu3o de engenharia, podendo ser utilizada em diversos tipos de setores consumidor de energia. Segundo Horlock (1987), cogera3o pode ser definida como a gera3o simult4nea, e combinada, de duas ou mais forma de energia, a partir de uma mesma fonte. Como resultado, a cogera3o fornece um maior aproveitamento da energia contida nessa fonte, e como consequ4ncia, redu3o de custos. Ao consumir mais eficientemente um recurso energ3tico, al4m da redu3o de custos, promove-se um al4vio ao meio ambiente, por meio de redu3o nos impactos ambientais associados ao consumo de recursos.

A cogera3o consegue aproveitar 80% da disponibilidade energ3tica, "utilizando" melhor o recurso energ3tico (combust4vel), em compara3o a aproximadamente 30% obtidos na gera3o individual el3trica (Del Carlo, 2013). Segundo Barja (2006), os avan3os tecnol3gicos trouxeram competitividade aos sistemas de cogera3o de pequeno porte, concorrendo em efici4ncia e oferecendo uma melhor praticidade na instala3o, manuten3o e opera3o quando comparada aos de grande porte.

No Brasil, a Ag4ncia Nacional de Energia El3trica (ANEEL) estabeleceu as condi3oes gerais para o acesso de microgera3o e miniger3o distribu4da aos sistemas de distribu3o de energia el3trica e ao sistema de compensa3o de energia el3trica atrav4s da Resolu3o Normativa N^o 482, de 17 de abril de 2012 (Brasil, 2012). Essa normativa foi alterada pela Resolu3o Aneel n^o 687/2015 (Brasil, 2015). O sistema de compensa3o de energia el3trica 4 um sistema onde a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgera3o ou miniger3o distribu4da 4 cedida, por meio de empr4stimo gratuito, 4 distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia el3trica ativa (Brasil, 2015).

Arenales (2007) define os modelos de Programaa3o Matem4tica como um tipo de modelo matem4tico que procuram representar o problema real. S3o exemplos de Programaa3o Matem4tica (otimiza3o matem4tica), a Programaa3o Linear (otimiza3o linear) e a Programaa3o Quadr4tica (otimiza3o quadr4tica), que 4 um tipo de Programaa3o N3o - linear (otimiza3o n3o - linear). Em um modelo de programaa3o linear as rela3oes matem4ticas (equa3oes) s3o todas lineares. Programaa3o linear se insere dentro dos m4todos de programaa3o matem4tica. Os m4todos de Programaa3o Matem4tica fornecem modelos, na sua maioria determin4sticos, normativos (e otimizantes), visando problemas de decis3o, bem estruturados, onde o grande desafio 4 a natureza combinat3ria das solu3oes (Ehrlich, 2004). Programaa3o linear se apresenta como um m4todo cient4fico de tomada de decis3o, o qual come3a descrevendo um sistema por interm4dio de um modelo e depois manipula o modelo para descobrir o melhor modo de operar esse sistema (Frossard & Filho, 2009). Ou seja, o modelo de programaa3o linear visa determinar o valor 3timo de uma fun3o linear, dando um conjunto de restri3oes lineares. um modelo matem4tico de programaa3o linear 4 composto de uma fun3o objetivo a de restri3oes t4cnicas representadas por um grupo de inequa3oes tamb4m lineares. A fun3o objetivo mede a efici4ncia e desempenho do sistema (no caso de maximiza3o mede a gera3o de lucro). As restri3oes garantem que essas solu3oes est3o de acordo com as limita3oes t4cnicas impostas pelo sistema (Frossard & Filho, 2009).

Obter uma configura3o adequada para o sistema de fornecimento de energia, que atenda 4s demandas energ3ticas (eletricidade, calor e refrigera3o) ter4 impactos diretos no consumo de recursos naturais e deveria ser indispens4vel em qualquer empreendimento. A otimiza3o no fornecimento de energia pode ter objetivo: i) econ3mico, minimizando os custos; ii) ambiental, minimizando impactos ambientais, ou ainda iii) multicrit4rio, considerando ambos aspectos ao mesmo tempo. Outras fun3oes objetivo que podem ser consideradas incluem ainda a potencial economia de energia (Potential Energy Savings,



PES-), eficiência termodinâmica, ou consumo de combustível (Frangopoulos, Von Spakovsky & Sciubba, 2002; Frangopoulos, 2009).

Em problemas de otimização busca-se maximizar ou minimizar uma quantidade específica, chamada objetivo, que depende de um número finito de variáveis de entrada. Estas variáveis podem ser independentes umas das outras ou podem ser relacionadas por meio de uma ou mais restrições. Programação Linear é um caso particular dos modelos de programação em que as variáveis são contínuas e apresentam comportamento linear, tanto em relação às restrições como à função objetivo. A Programação Inteira pode ser entendida como um caso específico da Programação Linear e se caracteriza no momento em que qualquer variável não puder assumir valores contínuos, ficando condicionada a assumir valores discretos (Prado, 1998).

A otimização pode restringir-se a configuração do sistema, ou a sua operação, ou incluir ambos. Esse trabalho otimiza a configuração e operação de um sistema de conversão e fornecimento de energia para um edifício do setor residencial, objetivando o mínimos custo anual, utilizando equipamentos disponíveis no mercado.

O trabalho de Melo e Carvalho (2016) apresentou ferramentas utilizadas para alcançar a sustentabilidade no setor residencial e um resumo dos aspectos regulatórios para microgeradores de energia elétrica, que podem ser aplicados a estudos de otimização. Há diversos casos de otimização energética do fornecimento de energia: por exemplo, Lozano et al. (2009) e Carvalho et al. (2013) desenvolveram estudos de otimização considerando os aspectos econômicos em edifícios do setor terciário na Espanha, enquanto Carvalho, Serra e Lozano (2011a) e Carvalho, Serra e Lozano (2011b) desenvolveram estudos de otimização considerando os aspectos ambientais. Ambas as considerações foram desenvolvidas por Carvalho, Lozano e Serra (2012). A mesma metodologia de otimização, validada e consolidada, foi aplicada a um edifício do setor terciário no Canadá (Romero, Carvalho & Millar, 2014), e até a minas (Romero, Carvalho & Millar, 2016; Carvalho et al., 2014; Millar et al., 2014). No Brasil, edifícios do setor terciário foram otimizados considerando os aspectos econômicos (Delgado et al., 2015; Carvalho, Romero & Millar, 2014) e ambiental (Carvalho, Delgado & Chacartegui, 2015; Carvalho, Abrahao & Delgado, 2016). A otimização do fornecimento de energia, que incluiu cogeração e trigeração para o setor residencial-comercial já foi estudada também por Carvalho et al. (2013), e Lozano et al. (2007). Sistemas de cogeração foram uma alternativa viável economicamente em Chacartegui et al. (2015).

3 Metodologia

3.1 Demandas Energéticas

O software utilizado para simulação do edifício residencial e determinação das demandas energéticas foi o Energyplus (DOE E BTO, 2017). Simulou-se uma edificação residencial, com sua localização escolhida para a cidade de João Pessoa, latitude $-7,11^\circ$ e longitude $-34,86^\circ$, com 20 pavimentos, cada pavimento com dois apartamentos de 92 m², com o objetivo de obter as demandas térmicas e de energia elétrica. O tamanho e divisões internas dos apartamentos foram escolhidos com base em apartamentos usados pela classe média de João Pessoa-Paraíba.

Para realizar essa simulação utilizaram-se dados climáticos do município de João Pessoa, produzidos pela Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC) a partir de dados registrados por estações climatológicas do INMET ((Roriz, 2012).

O estudo realizado se estende ao longo de um período de tempo de um ano, distribuídos em 2 Tipo dias (dia de semana e final de semana) de cada mês (12). Por sua vez, os dias foram subdivididas em 24 períodos horários, correspondente a cada hora do dia.



Consequentemente, tem-se um total de 576 períodos de funcionamento diferentes ao longo do ano. O resultado das demandas está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Demandas energéticas para cada dia representativo e para o ano inteiro.

Mês Dia Representativo	n _d (dias/ano)	Eletricidade	Água Quente	Refrigeração
		Total kWh/dia	Total kWh/dia	Total kWh/dia
Jan útil	20	451,96	211,19	989,12
Jan fds	11	497,68	206,60	1047,63
Fev útil	19	451,96	200,84	905,26
Fev fds	9	497,68	205,08	963,21
Mar util	20	451,96	194,44	1112,81
Mar fds	11	497,68	200,35	1111,51
Abr útil	20	451,96	219,05	542,76
Abr fds	10	497,68	223,22	793,03
Mai útil	20	451,96	223,29	590,77
Mai fds	11	497,68	212,93	607,82
Jun útil	19	451,96	236,98	385,45
Jun fds	11	497,68	226,00	321,20
Jul útil	20	451,96	231,00	221,92
Jul fds	11	497,68	236,57	249,04
Ago útil	20	451,96	247,34	314,79
Ago fds	11	497,68	236,57	226,80
Set útil	21	451,96	218,56	449,82
Set fds	9	497,68	220,72	409,47
Out útil	20	451,96	213,21	745,91
Out fds	11	497,68	215,99	695,51
Nov útil	20	451,96	211,96	889,70
Nov fds	10	497,68	217,73	807,72
Dez útil	20	451,96	207,37	1042,32
Dez fds	11	497,68	223,43	931,92
Σ		MWh/ano	MWh/ano	MWh/ano
Ano	365	171	83	242

3.2 Equipamentos

A síntese de um sistema de trieração começa com a criação de uma superestrutura, que deve incluir todos os processos e conexões possíveis. Uma vez otimizado o sistema, essa superestrutura se reduz a uma configuração ótima. Por tanto, deve assegurar que todos os equipamentos e fluxos que possam formar parte de uma configuração ótima estão incluídos na superestrutura inicial. Deve-se também permitir várias alternativas possíveis para cada processo.

A superestrutura de um sistema de trieração que satisfaça as demandas energéticas de calor, frio e eletricidade, conta com a possibilidade de instalação de equipamentos como: GNVA (caldeira de vapor à gás natural), EEVA (caldeira de vapor à eletricidade), MGAQ (motor de gás + recuperador de calor de água quente), TCVA (trocador de calor vapor-água quente), GNAQ (caldeira de água quente à gás natural), EEAQ (caldeira de água quente à eletricidade), TCAQ (trocador de calor água quente-água de refrigeração), FAAQ (máquina de refrigeração de absorção de simples efeito, acionada com água quente), FMAR (máquina de refrigeração mecânica com acionamento elétrico) e ICAR (torre de refrigeração para evacuar o calor da água de refrigeração).

As utilidades disponíveis são: GN (gás natural), VA (vapor saturado de água, 180 °C), AQ (água quente, 90 °C), AR (água de refrigeração, t₀ + 5°C), AA (ar ambiente, t₀), AF (água fria) e EE (energia elétrica).

A Figura 1 mostra a superestrutura do sistema de fornecimento de energia considerada no modelo. Para um sistema energético, todas as possibilidades de tecnologias para conversão de energia e todos os serviços energéticos possíveis podem ser representados na superestrutura (Figura 1), que inclui as conexões entre tecnologias de conversão de energia e indica os mecanismos de conversão disponíveis durante o processo de otimização. Neste caso particular, a superestrutura permite a compra e venda de eletricidade (EE) à rede elétrica, permitindo também a compra de gás natural (GN). Outras utilidades energéticas presentes na super-estrutura são: vapor (VA), água quente (AQ), água de refrigeração (AR), e água fria (AF). C representa as utilidades que podem ser compradas junto ao mercado (importação), V representa a venda (exportação), D representa as demandas do centro consumidor, e P representa as perdas ao meio ambiente (calor evacuado).

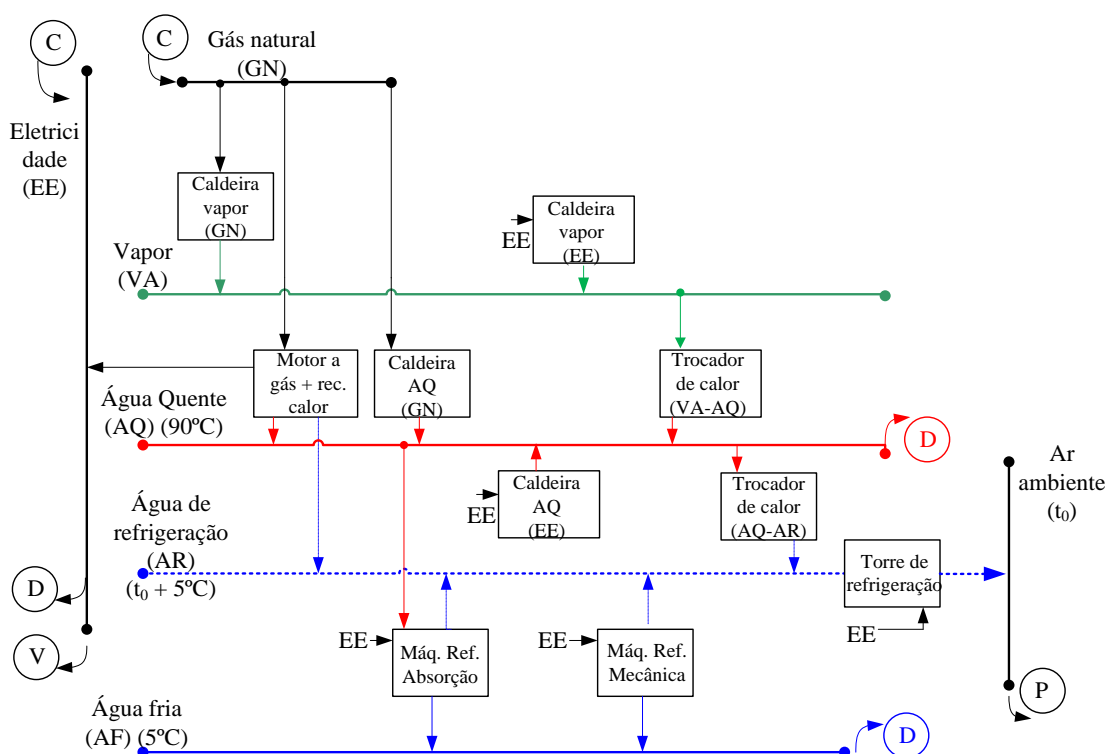


Figura 1: Superestrutura do sistema de fornecimento de energia.

Na Tabela 2 é apresentada as características técnicas e econômicas dos equipamentos da superestrutura. Os dados técnicos foram obtidos por meio de consultas à catálogos de fabricantes, disponíveis online, e os preços foram obtidos através de solicitações com representantes desses equipamentos. As linhas indicam as tecnologias potencialmente instaladas e as colunas as utilidades disponíveis. Os coeficientes de produção em negrito mostram o fluxo que define a capacidade do equipamento. Coeficientes positivos indicam que a utilidade é produzida, e coeficiente negativos indicam um consumo daquela utilidade. CINV são os custos de investimento do equipamento, obtido das solicitações feitas e manutenção e PNOM a potência nominal do equipamento.



Tabela 2:

Matriz de coeficientes técnicos de produção.

	GN	VA	AQ	AR	AA	AF	EE	C _{INV} (10 ³ R\$)	P _{NOM} (kW)
MGAQ	-3,06		1,77	0,1			1	175,74	108
GNVA	-1,24	1						54,00	116
EEVA		1					-1,15	42,50	150
TCVA		-1,10	1					3,35	150
GNAQ	-1,12		1					49,30	300
EEAQ			1				-1,11	28,20	150
TCAQ			-1,10	1				3,00	150
FAAQ			0,80	-1,71		1	0,01	342,78	350
FMAR				-1,24		1	0,24	102,25	180
ICAR				-1,00	1		0,02	5,00	180

3.3 Tarifa de eletricidade e gás natural

O condomínio residencial se enquadra no grupo B e sobgrupo B1 da Resolução Normativa da ANEL N ° 414 (Brasil, 2010). Para esse subgrupo pode ser aplicado duas modalidades de tarifa: A Tarifa Convencional Monômnia e a Tarifa Horária Branca. Esse segundo tipo de tarifa, a horária, só será implantada a partir de 2018. Em João Pessoa, a empresa responsável pela distribuição e comercialização de energia elétrica é a Energisa. A Energisa estabelece cinco classes de modalidade tarifária convencional residencial. Para o estudo realizado, foi considerado que o edifício residencial se encaixava na Modalidade Residencial Sem Benefício que custa 0,44206 R\$/kWh (ENERGISA, 2017).

A empresa responsável pela comercialização e distribuição de gás natural em João Pessoa é a PBGÁS (PBGÁS, 2017). A tarifa de gás natural é dividida em 7 grupo, são eles: residencial, industrial, comercial, veicular, comprimido, EBVA (Energético de Baixo Valor Agregado) e geração distribuída (ARPB, 2017). Para o setor residencial há 8 classes de tarifa, de acordo com o consumo de gás de natural. Para esse trabalho foi considerado um consumo médio entre 100 a 200 m³/mês, classe 4, com tarifa de 3,5392 R\$/m³.

3.4 Modelo Matemático

O modelo matemático construído para este trabalho estendeu e adaptou o modelo desenvolvido por Carvalho (2011), baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM). O modelo matemático foi implementado no software Lingo (LINDO SYSTEMS, 2017), software comercial para solução de problemas de otimização.

Um modelo de otimização pode representar a realidade se considerar a superestrutura do sistema relacionado, os modos de operação de cada componente do sistema e os fluxos entre esses componentes. Segundo Del Carlo (2013), fazem parte de um modelo de otimização dois conjuntos de equações:

- Função objetivo: indica 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.

O objetivo do problema é minimizar os custos anuais. Os custos anuais são formados pelos custos fixos (investimento inicial em equipamento) e custos variáveis (compra de recursos energéticos para atender às demandas, custos de operação e manutenção). A função objetivo pode ser representada da seguinte forma:

$$\text{MINIMIZAR } \text{CUSTOANUAL} = \text{CFI} + \text{CVA} \quad (1)$$

$$\text{CFI} = (\text{FAM})[\Sigma \text{TEC}(i) \text{CINV}(i)] \quad (2)$$

$$\text{CVA} = C_{\text{GÁS NATURAL}} + C_{\text{ELETRICIDADE}} - C_{\text{CRÉDITO COM ELETRICIDADE}} \quad (3)$$

Para cada tecnologia, a potência total instalada é igual ao número de equipamentos instalados vezes a potência nominal. Igualmente, o custo total de investimento (CINV(i)) é igual ao número de equipamentos instalados para cada tecnologia i vezes o custo individual. TEC(i) e CINV(i) são, respectivamente, o número de equipamentos instalados e custo de capital de cada equipamento i. C_{gás natural}, C_{eletricidade} e C_{crédito com eletricidade} referem-se aos custos de operação para a compra de gás natural, eletricidade e o crédito com a injeção de eletricidade cogerada na rede, segundo a normativa legal vigente.

FRC é o fator de recuperação de capital, e, considerando a taxa de juros como i_{yr}, e a vida útil do equipamento n_{yr}, FRC pode ser dado por:

$$\text{frc} = \frac{i_{yr} \cdot (1 + i_{yr})^{n_{yr}}}{(1 + i_{yr})^{n_{yr}} - 1} \quad (4)$$

No atual cenário econômico do Brasil, considerou-se uma taxa de juros igual a 10% a.a. e uma vida útil dos equipamentos igual a 15 anos (frc = 0,13).

O fator de amortização (FAM) do capital é igual ao fator de recuperação do capital mais um fator de manutenção e operação do sistema, que foi considerado como 7% dos custos de investimento do sistema.

$$\text{fam} = \text{frc} + \text{fmo} \quad (5)$$

As possibilidades de interação do sistema com o mercado econômico podem ser representadas por uma matriz binária (0 = não, 1 = sim) com indicadores para as possibilidades de compra (INDCOM), a demanda (INDDEM), a venda (INDVEN) e os desperdícios (INDDDES, por exemplo, no caso de calor evacuado) para cada um dos recursos energéticos disponíveis j:



Tabela 3:

Matriz de possibilidades de interacao do sistema.

Utilidade j	INDCOM	INDDEM	INDVEN	INDDES
Gás natural (GN)	1	0	0	0
Vapor (VA)	0	1	0	0
Água quente (AQ)	0	1	0	0
Água de refrigeração (AR)	0	0	0	0
Ar ambiente (AA)	0	0	0	1
Água fria (AF)	0	1	0	0
Eletricidade (EE)	1	1	1	0

Para cada intervalo de tempo, a produção de energia em cada equipamento i ($PIN(i)$), em um determinado dia d e determinada hora h , é restrita à capacidade instalada desses equipamentos:

$$PIN(i) = TEC(i).PNOM(i) \quad (6)$$

$$PROD(d, h, i) \leq PIN(i) \quad (7)$$

Onde, $TEC(i)$ é o número de equipamentos instalados da tecnologia i , $PNOM(i)$ é a potência nominal do equipamento e $PROD(d,h,i)$ é a potência produzida pela tecnologia i , em uma determinada hora h do dia d . O balanço energético deve ser cumprido para cada utilidade j , na seguinte forma:

$$COM(d, h, j) + PRO(d, h, j) - CON(d, h, j) - DEM(d, h, j) - VEN(d, h, j) - PER(d, h, j) = 0 \quad (8)$$

$$PRO(j, d, h) = \sum X(i, j, d, h).YTUP(i, j) \quad \text{com } YTUP(i, j) \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$CON(j, d, h) = \sum X(i, j, d, h).YTUC(i, j) \quad \text{com } YTUC(i, j) \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$PER(j, d, h) \leq YUP(j). (CON(j, d, h) + DEM(j, d, h)) \quad \text{com } YUP(j) \in \{0,1\} \quad (11)$$

$$VEN(j, d, h) \leq YUS(j).PRO(j, d, h) \quad \text{com } YUS(j) \in \{0,1\} \quad (12)$$

$$PER(j, d, h) \leq YUW(j).PRO(j, d, h) \quad \text{com } YUW(j) \in \{0,1\} \quad (13)$$

$$DEM(j, d, h) \leq YUD(j). (PRO(j, d, h) + COM(j, d, h)) \quad \text{com } YUD(j) \in \{0,1\} \quad (14)$$

Onde, $COM(d,h,j)$, $PRO(d,h,j)$, $CON(d,h,j)$, $DEM(d,h,j)$, $VEN(d,h,j)$ e $PER(d,h,j)$ são, respectivamente, a compra, a produção, o consumo, a demanda, a venda e a perda da utilidade j no período (d,h) . $YTUP(i, j)$ será 1 quando a tecnologia i produzir a utilidade j . $YTUC(i, j)$ será 1 quando a tecnologia i consumiu utilidade j . Produção (PRO) e Consumo (CON) corresponderam aos fluxos de serviços internos. Compra (COM), Venda (VEN), Perdas (PER) e Demanda (DEM) correspondem aos fluxos de serviços públicos trocados entre o sistema energético eo meio. As variáveis binárias $YUP(j)$, $YUS(j)$, $YUW(j)$ e $YUD(j)$ indicam, respectivamente, a possibilidade desses intercâmbios.



4. Análise dos Resultados

O resultado da síntese e otimização foi obtido por meio da solução do modelo matemático apresentado, usando o software Lingo, para minimizar os custos anuais. Criou-se um "sistema de referência", no qual as demandas são atendidas de maneira tradicional (sem cogeração ou integração energética). Os resultados para o sistema convencional estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4:

Sistema de referência, com as demandas sendo atendidas sem cogeração ou integração energética

Composição do sistema	Sistema de Referência	
	Número	Potência Instalada
Motor a gás	-	0
Caldeira a Vapor (GN)	0	0
Caldeira de água quente (GN)	0	0
Caldeira a vapor (EE)	0	0
Caldeira de água quente (EE)	1	150 kW
Trocador de Calor VA->WC	0	0
Trocador de Calor WC->WR	0	0
Chiller de Absorção	-	0
Chiller Mecânico	1	180 kW
Torre de Resfriamento	2	360 kW
Consumo de Gás Natural (MWh/ano)		0
Compra de Eletricidade (MWh/ano)		308
Créditos de eletricidade (MWh/ano)		-
Custo fixo	32303 R\$/ano	
Custo variável	136048 R\$/ano	
Custo Total	168351 R\$/ano	

Ao resolver-se o modelo de otimização sem restrições para cogeração, houve 74586 variáveis nos quais 596 são inteiras. O modelo apresentou 56146 interações. Para o sistema otimizado economicamente, o mínimo custo anual está associado a não-instalação de cogeração (Tabela 5). Para o caso desse estudo, os mínimos custos anuais são obtidos com a instalação de uma caldeira de água quente a energia elétrica atendendo a demanda de calor, uma máquina de refrigeração mecânica atendendo a demanda de refrigeração e uma torre de resfriamento evacuando o calor residual da máquina de refrigeração, com a energia elétrica sendo comprada diretamente da rede.



Tabela 5:

Dados do resultado ótimo econômico.

Composição do sistema	Sistema Econômico Ótimo	
	Número	Potência Instalada
Motor a gás	0	0
Caldeira a Vapor (GN)	0	0
Caldeira de água quente (GN)	0	0
Caldeira a vapor (EE)	0	0
Caldeira de água quente (EE)	1	150 kW
Trocador de Calor VA->WC	0	0
Trocador de Calor WC->WR	0	0
Chiller de Absorção	0	0
Chiller Mecânico	1	179
Torre de Resfriamento	2	360
Consumo de Gás Natural (MWh/ano)	0 (Custo: 0 R\$/ano)	
Compra de Eletricidade (MWh/ano)	308 (Custo: 136048 R\$/ano)	
Créditos de eletricidade (MWh/ano)	0 (Custo: 0 R\$/ano)	
Custo fixo (R\$/ano)	32303 R\$/ano	
Custo variável (R\$/ano)	136048 R\$/ano	
Custo Total (R\$/ano)	168351 R\$/ano	

Esse resultado é justificado pela pouca demanda de calor obtida para a edificação estudada, inviabilizando a instalação de uma planta de cogeração. Também pode ser justificado pelo elevado preço da máquina de refrigeração por absorção, inviabilizando a trigerção.

O trabalho de Carvalho (2011) apresentou como resultado do modelo de otimização 3 motores a gás, 3 caldeiras de água quente, 4 trocadores de calor, uma máquina de refrigeração por absorção, 3 máquinas de refrigeração mecânica e 3 torres de resfriamento, para atender demandas de um hospital na Espanha de calor, energia elétrica e refrigeração, iguais a respectivamente, 8059 , 3250, 1265 MWh/ano. Pode-se observar, a partir dessas demandas, que a demanda de calor tem um expressivo valor em relação a demanda de refrigeração e energia elétrica.

Segundo Barja (2006), geralmente um sistema de cogeração é dimensionado em função da demanda térmica (paridade térmica), e então a produção de eletricidade pode ser inferior ou superior à demanda elétrica, e então o sistema pode exportar ou importar eletricidade da rede elétrica. Como a demanda do condomínio residencial, objeto de estudo desse trabalho, era muito inferior as outras, isso pode ter inviabilizado a cogeração. Deve salientar também que a legislação do trabalho de Carvalho (2011) permitia a venda de excedente elétrico para a rede, fazendo disso uma fonte de renda para o hospital. Apesar dos avanços nos últimos anos, nossa legislação só permite a injeção de excedente na forma de compensação, como um empréstimo gratuito compensado posteriormente com o consumo de energia elétrica, esse aspecto também pode ter inviabilizado a implantação de uma planta de cogeração.

O trabalho de Pereira (2009) foi um estudo de desenvolvimento de micro-cogeração aplicado no setor residencial de Portugal. Nele, a cogeração gerou benefícios econômicos para a residência. Deve salientar, mais uma vez, que para o estudo adotado por Pereira (2009) tinha uma expressiva demanda de calor devido a necessidade de calor para aquecimento do



ambiente. Segundo Sakatsume (2004), a maior parte da energia a ser aproveitada na cogeração é a energia térmica, então, sem dúvida, a relação entre a demanda de calor e eletricidade é um ponto a se considerar no sistema. Ainda segundo Saktsume (2004), no Brasil, fica clara a necessidade de priorizar microcogeneradores que produzam a maior quantidade de energia elétrica possível ou acoplar um sistema de refrigeração por absorção (trigeração). Porém, devido aos altos custos de aquisição para esse tipo de equipamento, a trigeração não se torna viável economicamente.

Delgado (2015) apresentou dois resultados de otimização, sendo um deles obrigatório o uso de 200 painéis fotovoltaicos. O primeiro resultado mostrou que o fornecimento de energia com menor custo anual era obtido com o uso de uma caldeira a vapor (biomassa como combustível), um trocador de calor, três caldeiras de água quente, sendo duas delas alimentada com biomassa e a outra com energia elétrica, três máquinas de refrigeração mecânica, uma torre de resfriamento e 200 painéis fotovoltaicos (de uso obrigatório). O segundo mostrou como resultado ótimo os mesmos equipamentos, mas sem utilizar os painéis fotovoltaicos, devido ao seu elevado custo e baixa produção de energia elétrica. Esses equipamentos seriam para atender as demandas de calor, refrigeração e energia elétrica de um hospital em João Pessoa. Tais demandas são, respectivamente, 2085 (sendo 1947MWh/ano de água quente e 138 MWh/ano de vapor), 2309 e 2791 MWh/ano. Apesar da expressiva demanda de calor em relação a demanda de eletricidade e refrigeração, o sistema otimizado não resultou em cogeração ou trigeração.

5. Considerações Finais

A decisão de investimento em uma central cogeneradora deve ser realizada com base em um processo de otimização para obtenção de uma melhor performance de uma configuração determinada, gerando um sistema otimizado. Nesse trabalho, o processo de otimização foi realizado com bases em diversos equipamentos com seus dados técnicos e econômicos retirados de catálogos de fabricantes e através de solicitação feitas a revendedores desses equipamentos. Nesse processo foi considerado aspectos econômicos e legais, de acordo com o que estabelece a Resolução Normativa da ANEEL 482, bem como os preços de energia elétrica e gás natural e as flutuações das demandas ao longo do ano, determinadas pelo Energyplus para um edifício residencial localizado na cidade de João Pessoa.

O resultado apresentado da demanda de água quente foi de 83 MWh/ano, menos da metade da demanda de energia elétrica e de refrigeração que são, respectivamente, 170,7 e 242 MWh/ano. O resultado da otimização do sistema, que tinha como objetivo minimizar os custos anuais do condomínio, considerando todas as situações possíveis, não resultou em cogeração. A energia elétrica foi suprida com a compra de eletricidade da rede, a demanda de água quente foi suprida por uma caldeira elétrica e a refrigeração foi suprida por um chiller mecânico.

Observa-se nesse trabalho a dificuldade de implantação de um sistema de cogeração, gerando benefícios econômicos no setor residencial para um clima tropical, onde a necessidade de calor é baixa em relação as demais e a inviabilidade de se utilizar uma máquina de refrigeração por absorção para implantar a trigeração, devido ao seu alto custo de investimento. Apesar da nossa legislação ter avançado bastante nos últimos anos a respeito da microgeração, ela não viabilizou, através do sistema de compensação, a cogeração nesse setor.



Referências

ARENALES, M; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H., (2007) Pesquisa Operacional. [S.l.]: Elsevier.

ARPB. RESOLUÇÃO DA DIRETORIA DA ARPB Nº 002/2017. (2017). João Pessoa. Disponível em: <<http://arpb.pb.gov.br/legislacao/resolucoes/resolucao-de-diretoria-da-arpb-002-2017/view>> Acesso em 8 de fev de 2017.

BARJA G. J. A. A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico, (2006). 171 f. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica), Universidade de Brasília, Brasília.

BRASIL. Resolução Normativa Nº482, de 17 de abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Brasil. 2012.

BRASIL. ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414, DE 9 DE SETEMBRO DE 2010. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414comp.pdf>> Acesso em 20 mai 2016.

BRASIL. ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015. 2015. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>> Acesso em 20 mai 2016.

CARVALHO, M.; LOZANO, M. A.; SERRA, L. M. (2012) Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects. Applied Energy, v. 91, p. 245-254.

CARVALHO, M.; SERRA, L. M.; LOZANO, M. (2011a) A. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. Energy (Oxford), v. 36, p. 3779-3790.

CARVALHO, M.; SERRA, L. M.; LOZANO, M. A. (2011b). Geographic evaluation of trigeneration systems in the tertiary sector. Effect of climatic and electricity supply conditions. Energy (Oxford), v. 36, p. 1931-1939.

CARVALHO, M.; LOZANO, M.A.; RAMOS, J.C.; SERRA, L.M. (2013). Synthesis of Trigeneration Systems: Sensitivity Analyses and Resilience. The Scientific World Journal, v. 2013, p. 1-16, 2013.

CARVALHO, M.; MILLAR, D. L. (2012) Concept Development of Optimal Mine Site Energy Supply. Energies (Basel), v. 5, p. 4726-4745.

CARVALHO, M.; ROMERO, A.; SHIELDS, G.; MILLAR, D. L. (2014). Optimal synthesis of energy supply systems for remote open pit mines. Applied Thermal Engineering, v. 64, p. 315-330.



CARVALHO, M.; ROMERO, A. ; MILLAR, D. L. .(2014). BIOMASSA E ENERGIA SOLAR TÉRMICA NA SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE POLIGERAÇÃO. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014, Recife. Anais do V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Recife: Associação Brasileira de Energia Solar.

CARVALHO, M. (2011). Thermoeconomic and environmental analyses for the Sybthesis of polygeneration systems in the residential-comercial sector. Zaragoza.

CHACARTEGUI, R.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R.; BECERRA, J.(2015). Analysis of a CHP plant in a municipal solid waste landfill in the South of Spain. AppliedThermalEngineering, v. 91, p. 706-717.

CARVALHO, M.; DELGADO, D. B. M. ; CHACARTEGUI, R. . LIFE CYCLE ANALYSIS AS A DECISION CRITERION FOR THE IMPLEMENTATION OF SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS IN A NORTHEAST BRAZIL HOSPITAL. (2015). In: Global Conference on Global Warming, 2015, Atenas, Grécia. proceedings of the global conference on global warming.

CARVALHO, M.; ABRAHAO, R. ; DELGADO, D. B. M. (2016). Energía solar térmica en la síntesis y optimización ambiental de un sistema de suministro energético. In: X Congreso Internacional de Refrigeración, Climatización y Energías Renovables, 2016, La Havana. anais do X Congreso Internacional de Refrigeración, Climatización y Energías Renovables. La Havana: Cuba Industria.

CASTRO, J. B.; MONTINI, A. A.(2010).Previsão Do Consumo Residencial De Energia Elétrica No Brasil: Aplicação Do Modelo Arx. Future Studies Research Journal: Trends and Strategies. São Paulo. dez.

DEL CARLO F.R. (2013). Análise exergoeconômica aplicada a microcogeraçãoemcondomínios residenciais, 2013, 94 f. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

DELGADO, D.B.M. (2015).Otimização Econômica e Ambiental de um Sistema de Poligeração Incluindo Energia Solar Fotovoltaica e Biomassa: Estudo de Caso em um Hospital Paraibano. João Pessoa.

DELGADO, D. B. M. ; CARVALHO, M. ; CHACARTEGUI, R. ; COELHO JUNIOR, L. M. . OPTIMIZATION OF ENERGY SUPPLY AND CONVERSION IN A NORTHEAST BRAZIL HOSPITAL: USE OF PHOTOVOLTAIC PANELS. (2015) In: 23rd ABCM Internationa Congress of Mechanical Engineering, 2015, Rio de Janeiro. Proceedings of the 23rd ABCM INternationa Congress of Mechanical Engineering.

DOE; BTO. Energyplus. Versão 8.7.0. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 26 de maio de 2017.

EHRlich, P. J. (2004). Programação Linear e Decisão. FGV- EAESP.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2015. Disponível em:



<<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese.aspx?anoColeta=2015&anoFimColeta=2014>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2016.

ENERGISA. Modalidade Tarifaria Convencional Baixa Tensao. Disponivel em: <<http://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>>. Acesso em: 27 de janeiro de 2017.

FRANGOPOULOS, C. A.; VON SPAKOVSKY, M.R.; SCIUBBA, E.(2002). A brief review of methods for the design and synthesis optimization of energy systems. International Journal of Thermodynamics, v. 5, n. 4, p. 151-160.

FRANGOPOULOS, C.A. (2009). Optimization methods for energy systems. In: FRANGOPOULOS, C.A.(Ed.). Exergy, energy system analysis and optimization – Vol. II. [s.l.]:Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).

FROSSARD, A. C. P.; FILHO, F. L. (2009). Programacao Linear: Maximizacao de Lucro e Minimizacao de Custos. Revista Cientifica da Faculdade Lourenço Filho. v.6, n.1.

GARCIA, X. (2006). Analysis of building energy y regulation and certification in Europe. Their role, limitations and differences, Energy and Buildings, vol. 38, pp. 381-392.

HORLOCK, J. H. (1987). Combined heat and power. New York: Pergamon Press.

IEA - International Energy Agency. Energy Technology Perspectives - Scenarios & Strategies to 2050.2012. Disponivel em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012_free.pdf> Acesso em 10 mai 2016.

INMETRO. Manual para etiquetagem de edificacoes publicas. 2014. Disponivel em: http://www.comprasgovernamentais.gov.br/arquivos/sustentabilidade/manual_etiquet_edific_publicas_20141010.pdf . Acesso em: 19 de maio de 2016.

LINDO SYSTEMS. Lingo. Versao 16.0. Disponivel em: <<http://www.lindo.com/index.php/products/lingo-and-optimization-modeling>> Acesso em: 26 de maio de 2017.

LOZANO, M.A.; RAMOS, J.C. (2007). Thermodynamic and Economic Analysis of Simple Cogeneration Systems. Informacion tecnologica, v.18, n.5, p. 75 -84.

LOZANO, Miguel A. et al. (2009). Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings. Energy and Buildings, v. 41, n. 10, p. 1063-1075.

MELO, F. M. (2017). Sintese e otimizacao de um sistema energetico para um edificio do setor residencial em João Pessoa-PB. Dissertacao de Mestrado, Programa de Pós-Graduacao em Eng. Mecanica, Universidade Federal da Paraiba. João Pessoa: UFPB.

MELO, F. M. ; CARVALHO, M. (2016). Cogeraçao Como Ferramenta Para Alcançar A Sustentabilidade Energetica No Ambiente Residencial. In: II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construcao Sustentaveis, 2016, João Pessoa. Anais do II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construcao Sustentaveis.



MILLAR, D. L. ; ROMERO, A. ; CARVALHO, M. ; LEVESQUE, M. Y. (2014) . Optimal Mine Site Energy Supply. In: Helen Muga; Michelle Eggart. (Org.). Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. 1ed.Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), v. 1, p. 389-430.

PBGÁS. Página web. 2017. Disponível em: <http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477>. Acesso em 8 de fev de 2017.

PRADO, D. (1998). Programação linear. Editora de Desenvolvimento Gerencial.

ROMERO, Alberto; CARVALHO, Monica; MILLAR, Dean L. (2014). Application of a polygeneration optimization technique for a hospital in northern Ontario. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, v. 38, n. 1, p. 45.

ROMERO, Alberto; CARVALHO, Monica; MILLAR, Dean L. (2016). Optimal design and control of wind-diesel hybrid energy systems for remote Arctic mines. Journal of Energy Resources Technology, v. 138, n. 6, p. 062004.

RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiro, São Paulo: ANTAC, 2012. Disponível em: http://www.roriz.eng.br/epw_9.html. Acessado em 6 de fevereiro de 2017.

SAKATSUME, F. H.; (2004). Uso de cogeração no setor residencial: A aplicação de mini e micro-cogeradoresà gás natural. Rio de Janeiro:UFRJ.

SERRA, L.; RAMOS, J.; LOZANO, M.; ENSINAS, A. (2007). Poligeneración: hacia una utilización sostenible de los recursos naturales. In: Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007, Cochabamba. Anais...Cochabamba: J. Feyen et al.), Vol. III, pp. 1832-1839.