

## **Análise de Sensibilidade para um Sistema Otimizado de Fornecimento de Energia Para um Edifício Residencial em João Pessoa - PB**

**FILIPY MACIEL DE MELO**

UFPB - Universidade Federal da Paraíba  
filipismaciel@gmail.com

**MONICA CARVALHO**

Universidade Federal da Paraíba  
monica.carvalho@cear.ufpb.br



## ANÁLISES DE SENSIBILIDADE PARA UM SISTEMA OTIMIZADO DE FORNECIMENTO DE ENERGIA PARA UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM JOÃO PESSOA - PB

### Resumo

Esse trabalho apresenta análises de sensibilidade para a solução otimizada economicamente para o fornecimento de energia de um edifício residencial na cidade de João Pessoa. Essa edificação possui 40 apartamentos de 92 m<sup>2</sup>. A solução ótima atendeu às demandas do edifício de maneira convencional: eletricidade comprada da rede atendeu diretamente a demanda de eletricidade, e por meio de caldeira e *chiller* mecânico, satisfaz as demandas de calor e refrigeração. As análises de sensibilidade permitiram observar o comportamento da solução ótima de fornecimento de energia para um centro consumidor do setor residencial, a partir da variação dos preços do gás natural, eletricidade, das demandas, dos hábitos dos moradores, do fator de amortização e da relação entre as demandas de eletricidade e gás natural. Contudo, apesar de todas as variações feitas nas análises de sensibilidade, não se obteve nenhum resultado onde a cogeração gerava benefícios econômicos para o setor, para o caso específico de um edifício em João Pessoa.

**Palavras-chave:** Análise de sensibilidade, otimização, programação linear inteira mista, residencial.

### Abstract

This work presents sensitivity analyzes for the economically optimized solution for the power supply of a residential building in the city of João Pessoa. This building has 40 apartments of 92 m<sup>2</sup>. The optimal solution met the demands of the building in a conventional way: purchased electricity from the grid directly met the demand for electricity, and by means of boiler and mechanical chiller, met the demands of heat and cooling. The sensitivity analyzes allowed observing the behavior of the optimal energy supply solution for a consumer center in the residential sector, based on natural gas, electricity, demand, residents' habits, depreciation factor and relation Between the demands of electricity and natural gas. However, despite all the variations made in the sensitivity analyzes, no results were obtained where cogeneration generated economic benefits for the sector, for the specific case of a building in João Pessoa.

**Keywords:** Sensitivity analysis, optimization, mixed integer linear programming, residential.



## 1 Introdução

O termo sustentabilidade tem estado muito presente nos meios de comunicação, nas escolas, na política e em todos os espaços sociais. Existem vários conceitos para esse termo: Lourenço e Carvalho (2013) apresentam um conceito de sustentabilidade ou de desenvolvimento sustentável como uma maneira de atender às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades. No setor energético, a tendência global é a busca de uma matriz energética renovável, uma redução no uso de combustíveis fósseis e um uso de energia de forma adequada, sem desperdícios. Uma das formas de alcançar a sustentabilidade energética é a substituição progressiva das fontes de energia convencionais (combustíveis fósseis) por fontes alternativas, como a solar e a eólica. Também pode-se aproveitar a energia térmica rejeitada ao meio ambiente, por meio da aplicação de técnicas de integração térmica e cogeração.

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.*, 2009). A integração energética combina as necessidades e enfatiza o processo por inteiro, considerando as interações entre processos do sistema.

Um sistema de fornecimento de energia pode ser otimizado economicamente, considerando possibilidades de cogeração e integração energética, de modo a atender as demandas de um centro consumidor com mínimos custos. A solução ótima depende de um conjunto de variáveis, tais como preço dos recursos, das demandas, dos custos. Essas variáveis estão sujeitas a flutuações ao longo do tempo e por isso as análises de sensibilidade são realizadas para informar o efeito da mudança desses dados na solução ótima. Análises de sensibilidade tem um importante papel na estimativa dos parâmetros de interesse, uma vez que permitem estudar, analisar e avaliar o comportamento da grandeza observável frente às variações ocorridas nestes parâmetros (Telles *et al.*, 2016).

O desenvolvimento real dos sistemas de energia sustentável continua sendo desafiador devido à ampla gama de fatores técnicos, econômicos e institucionais que precisam ser considerados ao longo do ciclo de vida do sistema. É necessário aprofundar conhecimento nas propriedades fundamentais dos sistemas que já foram instalados com sucesso: eficiência, flexibilidade e robustez, em vez de utilizar métodos tradicionais para analisar custos, benefícios e riscos. O projeto de um sistema combinado de produção deve considerar não só as incertezas técnicas, mas também econômicas e institucionais. Quando se fala em incertezas, significa uma falta geral de conhecimento sobre o futuro.

A análise de sensibilidade é o estudo de como a variação na produção de um modelo pode ser distribuída, qualitativa ou quantitativamente, em diferentes fontes de variação e ou como o modelo dado depende da informação que é fornecida. A análise de sensibilidade é uma técnica utilizada para determinar como valores diferentes de uma variável independente afetarão uma variável dependente específica sob um determinado conjunto de premissas. Ao criar um determinado conjunto de cenários, o analista pode determinar como as mudanças em uma (s) variável (s) afetarão a variável alvo.

Neste ponto, esclarecem-se as inovações desta pesquisa para ampliar a base de conhecimento existente. Será analisada a robustez da estrutura ideal correspondente a solução ótima adotada. Em outras palavras, será investigado como um projeto concreto pré-estabelecido como uma configuração ideal suportará mudanças externas. A análise não considerará a validade ou a qualidade do modelo matemático empregado, mas detalhará como a decisão de otimização suporta incertezas técnicas e econômicas futuras (por exemplo, mudanças nas demandas de energia, custos de amortização e manutenção, preços de gás).



Em Melo, Silva e Carvalho (2017), os autores forneceram informações detalhadas sobre as demandas de energia para um edifício residencial com 40 apartamentos localizado na cidade de João Pessoa-PB (Brasil), e em Melo e Carvalho (2017), os autores explicaram a superestrutura do sistema de fornecimento de energia considerado para a síntese e desenvolveram um modelo matemático baseado em programação linear inteira mista (PLIM) para o problema de síntese e otimização operacional. O modelo inclui: (1) a determinação do tipo, número e capacidade do equipamento instalado no sistema de fornecimento de energia e (2) o estabelecimento da operação ideal para os diferentes componentes da planta. Em uma base horária ao longo de um ano representativo. Agora, neste artigo, analisa-se como usar o modelo de programação matemática para fornecer aos tomadores de decisão informações sobre os problemas de decisão subjacentes. Este artigo não apresenta uma nova metodologia, mas desenvolve análises de sensibilidade e resiliência. A visão de uma solução revela como as decisões ótimas são afetadas por atualizações nas informações sobre as variações da demanda, fatores econômicos e restrições legais, ou seja, o grau de resiliência da solução ideal obtida.

Este trabalho apresenta análises de sensibilidade, com o objetivo de observar o comportamento da solução ótima de fornecimento de energia para um centro consumidor do setor residencial, a partir da variação dos preços do gás natural, energia elétrica, das demandas, dos hábitos dos moradores, do fator de amortização e da relação entre as demandas de energia elétrica e gás natural. O ponto de partida deste trabalho foi a otimização econômica realizada em Melo e Carvalho (2017), parte da dissertação de mestrado de Melo (2017).

## 2 Referencial Teórico

Arenales (2007) define os modelos de Programação Matemática como um tipo de modelo matemático que procura representar o problema real. São exemplos de Programação Matemática (otimização matemática) a Programação Linear (otimização linear) e a Programação Quadrática (otimização quadrática), que é um tipo de Programação Não-linear (otimização não-linear). Em um modelo de programação linear as relações matemáticas (equações) são todas lineares. Programação linear se insere dentro dos métodos de programação matemática, que fornecem modelos, na sua maioria determinísticos, normativos (e otimizantes), visando problemas de decisão, bem estruturados, onde o grande desafio é a natureza combinatória das soluções (Ehrlich, 2004).

Programação linear se apresenta como um método científico de tomada de decisão, o qual começa descrevendo um sistema por intermédio de um modelo e depois manipula o modelo para descobrir o melhor modo de operar esse sistema (Frossard, 2009). Ou seja, o modelo de programação linear visa determinar o valor ótimo de uma função linear, dando um conjunto de restrições lineares. Um modelo matemático baseado em programação linear é composto de uma função objetivo e de restrições técnicas representadas por um grupo de inequações também lineares. A função objetivo mede a eficiência e desempenho do sistema (no caso de maximização mede a geração de lucro, por exemplo). As restrições garantem que essas soluções estão de acordo com as limitações técnicas impostas pelo sistema (Frossard, 2009).

Para o problema de Programação Linear Inteira, há uma técnica particular de solução, chamada de Método *Branch-and-Bound*, que se baseia na montagem de um diagrama tipo árvore, em que cada ramo é uma opção de solução inteira. Todos os ramos são testados e para cada tentativa, o Método Simplex é utilizado. Se todas as variáveis forem inteiras, então esse problema pode ser classificado como de Programação Inteira Pura. Se todas as variáveis forem 0 ou 1, o problema é classificado de Programação Binária ou um Programação de Inteiros 0-1. Se parte das variáveis forem números inteiros, então o problema é chamado Programação Inteira Mista (Souza, 2016).



Para o setor energético, a otimização pode restringir-se a configuração do sistema, ou a sua operação, ou incluir ambos. O trabalho de Melo e Carvalho (2017) apresentou a otimização econômica que foi o ponto de partida para este trabalho, apresentando também uma compilação da literatura no tema.

A análise de sensibilidade consiste na modificação de variáveis, de modo que essa variação permite ao analista observar como se comporta uma variável específica. Ela parte da incerteza de um futuro a longo prazo, onde hipóteses devem ser consideradas para mudar esse cenário. Carvalho *et al.* (2013) realizaram uma análise de sensibilidade para um sistema otimizado de trigeração, a partir de programação linear inteira, em um hospital. Yoshida, Ito & Yokoyama (2007) também realizaram uma análise de sensibilidade para um sistema de otimização em um hospital. Já em Ashouri *et al.* (2014), as incertezas de operação foram utilizadas para realizar uma análise de sensibilidade em um prédio comercial em Zurich.

A análise de sensibilidade apresentada nesse trabalho é aplicada na solução ótima para o fornecimento de energia de edifício residencial de Melo (2017) e Melo e Carvalho (2017a), encontrada por meio da solução de um problema de programação linear inteira mista, que considera os aspectos técnicos, econômicos e legais do local da instalação, bem como as flutuações das demandas ao longo do dia de um centro consumidor do setor residencial. Observando o comportamento, não só da configuração do sistema, dentre as variações dos parâmetros, mas também da sua operação, dos custos totais anuais do centro.

### 3 Metodologia

#### 3.1 Configuração de ótimo econômico

O estudo realizado se estende ao longo de um período de tempo de um ano, distribuídos em 2 dias representativos (dia de semana e final de semana) para cada mês, totalizando 24 dias representativos. Por sua vez, os dias foram subdivididos em 24 períodos horários, correspondente a cada hora do dia. A obtenção das demandas energéticas está detalhada em Melo, Silva e Carvalho (2017). Essas demandas foram obtidas por meio do software Energyplus (DOE e BTO, 2017). A edificação residencial simulada está localizada na cidade de João Pessoa, latitude  $-7,11^\circ$  e longitude  $-34,86^\circ$ , com 20 pavimentos, cada pavimento com dois apartamentos de  $92 \text{ m}^2$ . Os dados climáticos utilizados do município de João Pessoa foram produzidos pela Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC) a partir de dados registrados por estações climatológicas do INMET (RORIZ, 2012). Essas demandas foram de 171, 83 e 242 MWh/ano de eletricidade, aquecimento de água e refrigeração, respectivamente (MELO; CARVALHO, 2017).

#### 3.2 Cenário Legal e Econômico

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). A ANEEL estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e ao sistema de compensação de energia elétrica através da Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012 (BRASIL, 2012). Essa normativa foi alterada pela Resolução Aneel n° 687/2015 (BRASIL, 2015). O sistema de compensação de energia elétrica é um sistema onde a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (BRASIL, 2015).



O condomínio residencial se enquadra no grupo B e subgrupo B1 da Resolução Normativa da ANEEL N ° 414 (BRASIL, 2010). Para esse subgrupo se aplica a Tarifa Convencional Monômnia. 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). Para o setor residencial há 8 classes de tarifa, de acordo com o consumo de gás de natural. Para esse trabalho foi considerada a classe 4, com tarifa de 3,5392 R\$/m<sup>3</sup>.

### 3.3 Configuração do Sistema

Uma vez definido o cenário econômico e a normativa legal correspondente ao local de instalação do sistema energético, deve-se definir a superestrutura do sistema de fornecimento de energia. Essa superestrutura está sendo representada pela Figura 1. Ela inclui todos os processos e conexões possíveis. Uma vez otimizado o sistema, essa superestrutura se reduz a uma configuração ótima.

A superestrutura satisfaz 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 resfriamento), FAAQ (máquina de refrigeração de absorção de simples efeito, acionada com água quente), FMAR (máquina de resfriamento mecânica com acionamento elétrico) e ICAR (torre de resfriamento para evacuar o calor da água de resfriamento).

As utilidades disponíveis são: GN (gás natural), VA (vapor saturado de água, 180 °C), AQ (água quente, 90 °C), AR (água de resfriamento,  $t_0 + 5^\circ\text{C}$ ), AA (ar ambiente,  $t_0$ ), AF (água fria) e EE (energia elétrica).

Na Tabela 1 apresentam-se as características técnicas e econômicas dos equipamentos da superestrutura. Os dados técnicos e tarifas foram obtidos por meio de consultas ao fabricante. CINV são os custos de investimento do equipamento, obtido das solicitações feitas e manutenção e PNOM a potência nominal do equipamento.

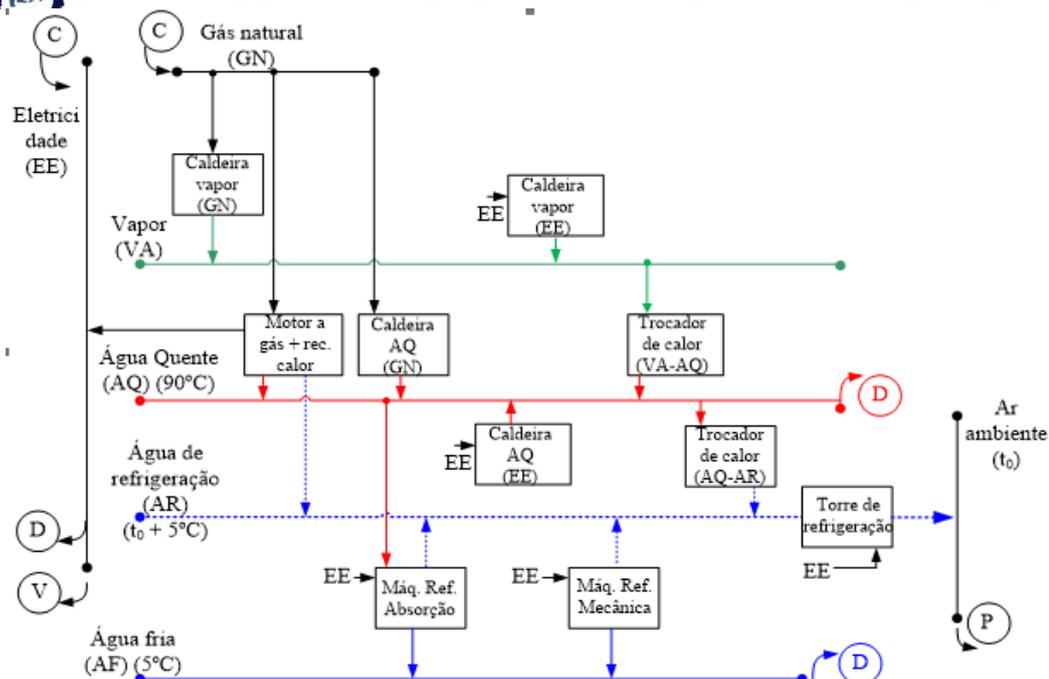


Figura 1: Superestrutura do sistema de fornecimento de energia.

Tabela 1:

Matriz de coeficientes técnicos de produção.

	GN	VA	AQ	AR	AA	AF	EE	C <sub>INV</sub> (10 <sup>3</sup> R\$)	P <sub>NOM</sub> (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

### 3.4 Modelo de Otimização

O modelo matemático desse trabalho é baseado em Programação Linear Inteira Mista. O modelo matemático foi implementado no software Lingo (LINDO SYSTEMS, 2017), software comercial para solução de problemas de otimização.

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). A função objetivo pode ser representada da seguinte forma:

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

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

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



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.  $C_{\text{gás natural}}$ ,  $C_{\text{eletricidade}}$  e  $C_{\text{crédito com eletricidade}}$  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 que considera taxa de juros e a vida útil do equipamento. 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 FRC mais um fator de manutenção e operação do sistema (FMO), que foi considerado como 7% dos custos de investimento do sistema.

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:

$$PIN(i) = TEC(i).PNOM(i) \quad (4)$$

$$PROD(d, h, i) \leq PIN(i) \quad (5)$$

Onde, 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 (CARVALHO, 2011):

$$COM(d, h, j) + PRO(d, h, j) - CON(d, h, j) - DEM(d, h, j) - VEN(d, h, j) - PER(d, h, j) = 0 \quad (6)$$

$$PRO(j, d, h) = \sum X(i, j, d, h).YTUP(i, j) \quad \text{com } YTUP(i, j) \in \{0,1\} \quad (7)$$

$$CON(j, d, h) = \sum X(i, j, d, h).YTUC(i, j) \quad \text{com } YTUC(i, j) \in \{0,1\} \quad (8)$$

$$PER(j, d, h) \leq YUP(j). (CON(j, d, h) + DEM(j, d, h)) \quad \text{com } YUP(j) \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$VEN(j, d, h) \leq YUS(j).PRO(j, d, h) \quad \text{com } YUS(j) \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$PER(j, d, h) \leq YUW(j).PRO(j, d, h) \quad \text{com } YUW(j) \in \{0,1\} \quad (11)$$

$$DEM(j, d, h) \leq YUD(j). (PRO(j, d, h) + COM(j, d, h)) \quad \text{com } YUD(j) \in \{0,1\} \quad (12)$$

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.



### **3.4 Análises de sensibilidade**

#### **3.4.1 Variação do Preço do Gás Natural**

A análise de sensibilidade do preço do gás natural foi feita variando em +10% e -10% o valor do preço do gás natural.

#### **3.4.2 Variação do Preço da Energia Elétrica**

A análise de sensibilidade do preço da energia elétrica foi feita variando em +10% e -10% o preço da energia elétrica.

#### **3.4.3 Mudança nos Hábitos no Consumo de Refrigeração**

Nessa análise de sensibilidade, foi considerado que os moradores da edificação passaram a consumir refrigeração durante 12 horas por dia ao invés de 8 horas.

#### **3.4.4 Aumento nas Demandas Energética**

Nessa análise de sensibilidade, todas as demandas energéticas foram aumentadas em +10% e +20%.

#### **3.4.5 Variação no Fator de Amortização**

A análise de sensibilidade do fator de amortização foi feita variando o fator de 0,2 para 0,15; 0,1; 0,25 e 0,3.

#### **3.4.6 Variação na Relação Entre as Tarifas de Energia Elétrica e Gás Natural**

Nessa análise de sensibilidade, a relação entre a tarifa de energia elétrica e gás natural foi aumentada até um ponto onde se observava cogeração.

### **4. Análise dos Resultados**

Ao resolver-se o modelo de otimização, houve 74586 variáveis nos quais 596 são inteiras. O modelo apresentou 56146 interações. Para o sistema otimizado economicamente, o mínimo custo anual esteve associado a não-instalação de cogeração. Os mínimos custos anuais foram 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 (MELO; CARVALHO, 2017).

A partir da solução ótima, faz-se necessário avaliar a estabilidade e o comportamento desse ponto ótimo dentre as variações de parâmetros tais como: preços do gás natural, preço energia elétrica, das demandas, dos hábitos dos moradores, do fator de amortização e da relação entre as demandas de energia elétrica e gás natural.

#### **4.1 Variação do Preço do Gás Natural**

A análise de sensibilidade do preço do gás natural foi feita variando em 10% o valor do preço do gás natural para mais e 10% para menos. A variação do preço 10% menor resultou em um sistema ótimo composto por uma caldeira de água quente a gás natural, uma máquina de refrigeração mecânica e duas torres de resfriamento como mostra a Tabela 2. A redução de 10% do preço do gás natural resultou em um novo sistema econômico ótimo, reduzindo os custos anuais de 168351 R\$/ano para 167259 R\$/ano. Já a variação do preço em



10% maior, resultou em um sistema ótimo composto por uma caldeira de água quente a energia elétrica, uma máquina de refrigeração mecânica e duas torres de resfriamento (o sistema não compra gás natural). O aumento em 10% do preço do gás natural não alterou o sistema ótimo econômico.

Como no sistema base, resultado da otimização, não utiliza gás natural como recurso energético para atender suas demandas, apenas energia elétrica. Um aumento no preço nesse recurso não altera sua configuração. A vantagem só aparece quando o preço diminui, tornando vantagem a substituição dos equipamentos que utiliza energia elétrica para produção de calor em equipamentos que utiliza gás natural para os mesmos fins.

Tabela 2:

Dados do resultado ótimo econômico considerando variações no preço do gás natural.

	-10%	Ótimo econômico (base)	+10%
Composição do sistema			
Motor a gás	0	0	0
Caldeira a Vapor (GN)	0	0	0
Caldeira de água quente (GN)	1	0	0
Caldeira a vapor (EE)	0	0	0
Caldeira de água quente (EE)	0	1	1
Trocador de Calor VA->WC	0	0	0
Trocador de Calor WC->WR	0	0	0
Chiller de Absorção	0	0	0
Chiller Mecânico	1	1	1
Torre de Resfriamento	2	2	2
Consumo de Gás Natural (MWh/ano)	89	0	0
Compra de Eletricidade (MWh/ano)	236	308	308
Créditos de eletricidade (MWh/ano)	0	0	0
Custo fixo (R\$/ano)	37157	32303	32303
Custo variável (R\$/ano)	130103	136048	136048
Custo Total (R\$/ano)	167259	168351	168351

## 4.2 Variação do Preço da Energia Elétrica

A análise de sensibilidade do preço da energia elétrica foi feita variando em 10% o valor do preço da energia para mais e 10% para menos. A variação do preço 10% menor resultou em um sistema ótimo composto por uma caldeira de água quente a energia elétrica, uma máquina de refrigeração mecânica e duas torres de resfriamento para evacuar o calor residual da máquina de refrigeração. Essa configuração está apresentada na Tabela 3. Observa-se uma diminuição nos custos anuais, de 168531 para 161518 R\$/ano provocada devido a diminuição no preço da energia elétrica. Já o aumento do preço da energia elétrica em 10%, resultou em um sistema ótimo composto por uma caldeira de água quente a gás natural, uma máquina de refrigeração mecânica e duas torres de resfriamento.

Como o sistema base utiliza puramente de energia elétrica como recurso, a variação desse recurso para mais vai tender a substituição dos equipamentos que utiliza energia elétrica, em equipamentos que utiliza gás natural para os mesmos fins. A variação desse recurso para menos vai diminuir os custos anuais com a compra de eletricidade.



Tabela 3:

**Dados do resultado ótimo econômico considerando variações no preço da eletricidade.**

	-10%	Base	+10%
<b>Composição do sistema</b>			
Motor a gás	0	0	0
Caldeira a Vapor (GN)	0	0	0
Caldeira de água quente (GN)	0	0	1
Caldeira a vapor (EE)	0	0	0
Caldeira de água quente (EE)	1	1	0
Trocador de Calor VA->WC	0	0	0
Trocador de Calor WC->WR	0	0	0
Chiller de Absorção	0	0	0
Chiller Mecânico	1	1	1
Torre de Resfriamento	2	2	2
Consumo de Gás Natural (MWh/ano)	0	0	89
Compra de Eletricidade (MWh/ano)	308	308	236
Créditos de eletricidade (MWh/ano)	0	0	0
Custo fixo (R\$/ano)	32303	32303	37157
Custo variável (R\$/ano)	116964	136048	144376
Custo Total (R\$/ano)	161518	168351	181532

### 4.3 Mudança de Hábitos do Consumo de Refrigeração

No sistema ótimo econômico, foi considerado que a refrigeração seria usada durante 8 horas por dia. Nessa análise de sensibilidade, foi considerado mudanças nos hábitos dos moradores do condomínio, usando a refrigeração 12 horas por dia, de 20:00 às 08:00 h. Essa mudança nos hábitos resultou em um aumento nos custos anuais e não obteve nenhuma mudança nos equipamentos utilizados em relação ao sistema ótimo econômico com exceção da torre de resfriamento que diminuiu uma unidade. A demanda de refrigeração neste caso subiu para 350 MWh/ano.

Tabela 4:

**Dados do resultado ótimo econômico considerando mudanças nos hábitos dos moradores.**

	Mais refrigeração	Base
<b>Composição do sistema</b>		
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	1
Trocador de Calor VA->WC	0	0
Trocador de Calor WC->WR	1	0
Chiller de Absorção	0	0
Chiller Mecânico	1	1
Torre de Resfriamento	1	2
Consumo de Gás Natural (MWh/ano)	0	0
Compra de Eletricidade (MWh/ano)	355	308
Créditos de eletricidade (MWh/ano)	0	0
Custo fixo (R\$/ano)	31153	32303
Custo variável (R\$/ano)	147994	136048



#### 4.4 Aumento das Demandas

Nessa análise de sensibilidade, foi considerado um aumento de 10 e 20% nas demandas de energia elétrica, calor e refrigeração. O aumento nas demandas resultou em um aumento nos custos anuais, porém o sistema ótimo econômico dos dois casos utiliza os mesmos equipamentos do sistema ótimo econômico. A Tabela 5 apresenta o sistema ótimo econômico para 10 % de aumento das demandas energéticas e para 20 % de aumento das demandas energéticas.

Tabela 5:

Dados do resultado ótimo econômico considerando variações das demandas.

	Base	+10%	+20%
Composição do sistema			
Motor a gás	0	0	0
Caldeira a Vapor (GN)	0	0	0
Caldeira de água quente (GN)	0	0	0
Caldeira a vapor (EE)	0	0	0
Caldeira de água quente (EE)	1	1	1
Trocador de Calor VA->WC	0	0	0
Trocador de Calor WC->WR	0	0	0
Chiller de Absorção	0	0	0
Chiller Mecânico	1	1	1
Torre de Resfriamento	2	2	2
Consumo de Gás Natural (MWh/ano)	0	0	0
Compra de Eletricidade (MWh/ano)	308	368	402
Créditos de eletricidade (MWh/ano)	0	0	0
Custo fixo (R\$/ano)	32303	32303	32303
Custo variável (R\$/ano)	136048	162774	177541
Custo Total (R\$/ano)	168351	195078	209844

Da mesma forma como ocorreu com o aumento da demanda da refrigeração. O aumento de todas as demandas não alterou a configuração do sistema base, pois os preços dos recursos continuavam os mesmos. Variaram apenas a quantidade consumida desses recursos, resultando em um aumento nos custos anuais.

#### 4.5 Variação no Fator de Amortização

Essa seção analisa a influência do fator de amortização na seleção das tecnologias envolvidas. A Tabela 8 mostra para cada fator de amortização considerado o tipo e o número de equipamentos instalados. A Tabela 6 e 7 mostra alguns resultados do sistema ótimo econômico para cada fator de amortização. Pode-se observar a partir das tabelas que a medida que diminuimos o fator de amortização, os custos anuais diminuem.

Como vimos, o fator de amortização do capital depende de alguns fatores, tais como a vida útil dos equipamentos e a taxa de juros. Quando variamos o fator de amortização, consideramos uma variação na vida útil dos equipamentos ou na taxa de juros. Observa-se que a diminuição nesse fator provoca uma diminuição nos custos anuais, porém a configuração se mantém constante, com exceção para o caso onde o fator de amortização é de 0,1. Nesse caso, considera-se uma vida útil elevada dos equipamentos e/ou uma baixa taxa de juros.



Tabela 6:  
Configuracao optima em cada variacao do fator de amortizacao do capital.

	FAM = 0,30	FAM = 0,25	FAM = 0,20	FAM = 0,15	FAM = 0,10
Motor a gas	0	0	0	0	0
Cald. VA (GN)	0	0	0	0	0
Cald. VA (EE)	0	0	0	0	0
Trocador(VA-AQ)	0	0	0	0	0
Cald. AQ (GN)	0	0	0	0	1
Cald. AQ (EE)	1	1	1	1	0
Trocador (AQ-AR)	0	0	0	0	0
Maq. Ref. Abs.	0	0	0	0	0
Maq. Ref. Mecanica	1	1	1	1	1
Torre Refrigerao	2	2	2	2	2

Tabela 7:  
Dados economicos em cada variacao do fator de amortizacao.

	FAM 0,30	FAM 0,25	FAM 0,20	FAM 0,15	FAM 0,10
Consumo de Gas Natural (MWh/ano)	0	0	0	0	89
Compra de Eletricidade (MWh/ano)	308	308	308	308	236
Creditos de eletricidade (MWh/ano)	0	0	0	0	0
Custo Anual Total	184503	176427	161518	160276	151630

#### 4.6 Variacao na Relacao Entre as Tarifas de Energia Elétrica e Gas Natural

A relacao entre as tarifas de energia e gas natural para o cenario definido nesse trabalho e de 1,37. A analise de sensibilidade desta secao considerou que o valor foi incrementado ate o ponto onde a otimizacao resultava em cogerao. Esse ponto foi de 3,15, e o aumento dessa relacao foi resultado do aumento da energia eletrica de 442 para 1.015 R\$/MWh. A configuracao do sistema otimo economico para essa nova relacao de precos esta apresentada na Tabela 8.

Essa situacao considera um caso hipotetico onde o preco da energia eleva-se para 1.015 R\$/MWh, nesse ponto, ha vantagem em utilizar um grupo gerador consumindo gas natural para producao de eletricidade e obter vantagem com o excedente injetado na rede.



Tabela 8:

Dados do resultado ótimo econômico considerando aumento na relação entre o preço da energia elétrica e o preço do gás natural.

Composição do sistema	$\alpha = 3,15$	
	Número	Potência Instalada
Motor a gás	1	108 kW
Caldeira a Vapor (GN)	0	0
Caldeira de água quente (GN)	0	0
Caldeira a vapor (EE)	0	0
Caldeira de água quente (EE)	0	0
Trocador de Calor VA->WC	0	0
Trocador de Calor WC->WR	1	150 kW
Chiller de Absorção	0	0
Chiller Mecânico	1	179
Torre de Resfriamento	2	360
Consumo de Gás Natural (MWh/ano)	241 (Custo: 77683 R\$/ano)	
Compra de Eletricidade (MWh/ano)	237 (Custo: 240724 R\$/ano)	
Crédito com Eletricidade	79 (Custo: 80023 R\$/ano)	
Custo fixo (R\$/ano)	66928	
Custo variável (R\$/ano)	238384	
Custo Total (R\$/ano)	305312	

## 5. Conclusões

O ponto ótimo encontrado em um problema de otimização está atrelado a diversas variáveis que podem alterar com o passar do tempo. Com isso, faz necessário observar como a solução otimizada se comporta dentre as variações desses parâmetros. Nesse trabalho, a análise de sensibilidade feita foi para uma solução ótima no fornecimento de energia de um centro consumidor do setor residencial, onde tinha como possibilidade de atender as demandas diversos equipamentos, entre eles, um motor a gás e uma máquina de refrigeração por absorção, permitindo a cogeração e trigeração.

Foram feitas seis análises de sensibilidade, variando o preços do gás natural, preço energia elétrica, das demandas, dos hábitos dos moradores, do fator de amortização e da relação entre as demandas de energia elétrica e gás natural. Foi observado que o sistema tendia a utilizar gás natural para aquecimento de água, sempre que o preço do gás natural era diminuído ou o valor da energia elétrica era aumentado. O uso do gás natural para aquecimento de água também foi observado quando o fator de amortização foi diminuído para 0,1. O aumento em todas as demandas em 10 e 20% não se observou qualquer alteração no sistema, apenas os custos variáveis que aumentaram pois o sistema passou a consumir mais eletricidade. Com a mudança no hábitos dos moradores, o sistema utilizou apenas uma torre de resfriamento ao invés de duas, isso provocou uma diminuição nos custos fixos, porém, os custos variáveis aumentaram bastante devido ao aumento da compra de eletricidade, esse aumento provocou um aumento nos custos totais anuais. O único ponto onde se observou benefícios econômicos com a utilização de cogeração na análise de sensibilidade foi no momento em que a relação entre a tarifa de energia elétrica e gás natural foi aumentada para 3,15, quase triplicando o valor da tarifa de energia elétrica, considerando um caso extremo de crise hídrica. Nesse ponto, existia um motor a gás com regenerador, produzindo calor e eletricidade e um chiller mecânico atendendo a demanda de refrigeração.

Com tudo, apesar de todas as variações feitas nas análises de sensibilidade, não se obteve nenhum resultado onde cogeração gerava benefícios econômicos para o setor



residencial, com excessão da análise de sensibilidade da relação de tarifas, que considera um caso hipotético e extremo de crise hídrica. Pode-se concluir que há uma dificuldade de implantação de uma planta de cogeração no setor residencial gerando benefícios econômicos. Apesar da nossa legislação ter avançado bastante nos últimos anos a respeito de micro e mini geração, essa dificuldade ainda persiste.

## Referências

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

ASHOURI, A., PETRINI, F., BORNATICO, R., & BENZ, M. J. (2014). Sensitivity analysis for robust design of building energy systems. *Energy*, 76, 264-275.

BRASIL. Resolução Normativa N°482, de 17 de abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Brasil. 2012.

BRASIL. ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015. 2015. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>> Acesso em 20 mai 2016.

BRASIL. ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 414, DE 9 DE SETEMBRO DE 2010. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414comp.pdf>> Acesso em 20 mai 2016.

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.

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

ENERGISA. (2017). Modalidade Tarifária Convencional Baixa Tensão. Disponível em: <<http://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>>. Acesso em: 27 de janeiro de 2017.

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

FROSSARD, A. C. P. (2009). Programação Linear: Maximização de Lucro e Minimização de Custos. *Revista Científica da Faculdade Lourenço Filho*. v.6, n.1.

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

LOURENÇO, L. M.; CARVALHO, D. (2013). “Sustentabilidade Social e Desenvolvimento Sustentável” . *RACE, Unoesc*, v. 12, n. 1, p. 9-38, jan/jun.



MELO, F. M. (2017). Síntese e otimização de um sistema energético para um edifício do setor residencial em João Pessoa-PB. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa: UFPB.

MELO, F. M. ; CARVALHO, M. (2017). Otimização econômica do fornecimento de energia a um edifício residencial localizado em João Pessoa-PB. In: VI Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade (VI SINGEP), 2017, São Paulo. Anais do VI SINGEP.

MELO, F. M. ; SILVA, A.L.T. ; CARVALHO, M. (2017). Establishment of energy demands for a residential building in João Pessoa, Northeast Brazil. In: International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), 2017, Curitiba.

PBGÁS. Página web. 2017. Disponível em: <[http://www.pbgas.com.br/?page\\_id=1477](http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477)>. Acesso em 8 de fev de 2017.

RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiro, São Paulo: ANTAC, 2012. Disponível em: [http://www.roriz.eng.br/epw\\_9.html](http://www.roriz.eng.br/epw_9.html). Acessado em 6 de fevereiro de 2017.

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.

SOUZA NETO, J. F. (2016). *Aplicação do Otimizador MPA na Operação de uma Rede de Escoamento de Petróleo em Tempo Real*. Mossoró: UERN.

TELLES, W. R.; RODRIGUES, P. P. G. W.; SILVA NETO, A. J. (2016). Calibração Automática da Plataforma MOHID Empergando Um Método Estocástico De Otimização De Dados Reais De Um Evento Climático Extremo em Nova Friburgo-RJ: parte 2 – Análise de Sensibilidade e Estimativa de Parâmetros Hidrológico. Rev. Int. Métodos Numéricos cal. Diseño ing.

YOSHIDA, S., ITO, K., & YOKOYAMA, R. (2007). Sensitivity analysis in structure optimization of energy supply systems for a hospital. Energy Conversion and Management, 48(11), 2836-2843.