

## **MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA PARA O DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE UMA TERMELÉTRICA - ESTUDO DE CASO: TERMELÉTRICA DO COMPLEXO LOGÍSTICO DO AÇU**

### **MIXED LINEAR INTEGER PROGRAMMING MODEL FOR THE OPTIMAL SIZING OF A THERMOELECTRIC - CASE OF STUDY: THERMOELECTRIC OF "COMPLEXO LOGÍSTICO DO AÇU"**

### **MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA PARA EL DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE UNA TERMOELÉCTRICA - ESTUDIO DE CASO: TERMOELÉCTRICA DEL "COMPLEXO LOGÍSTICO DO AÇU"**

Dalessandro Soares Vianna<sup>1</sup>, Jaime Batista de Sousa Junior<sup>2</sup>, Edwin Benito Mitacc Meza<sup>3</sup>, Marcilene de Fátima Dianin Vianna<sup>4</sup>

#### **RESUMO**

Neste trabalho é proposto um modelo de programação linear inteira mista que permite determinar a quantidade ótima de equipamentos necessários em uma usina termelétrica a partir de uma demanda de energia elétrica prevista, de maneira a minimizar os gastos com combustíveis gás natural e carvão e com custos de operação e manutenção dos equipamentos. Considera-se como estudo de caso o projeto da termelétrica do Complexo Logístico do Açú. Para a otimização do objeto de estudo, foram criados três cenários, cada um com 11 valores diferentes para as demandas de

energia elétrica. O modelo proposto considera dois tipos de ciclos termodinâmicos: o ciclo Rankine e o ciclo combinado. A resolução do conjunto de problemas teste foi realizada utilizando o software Lingo v10. Os resultados obtidos validam o uso do modelo no auxílio à configuração de uma usina termelétrica.

**Descritores:** Programação linear inteira; Pesquisa operacional; Termelétrica.

#### **ABSTRAT**

This work's proposal is to presents a mixed integer linear programming model for determining the optimum amount of equipment in operation required for a power plant from an expected electricity demand aiming, to minimize the cost of fuel consumption as coal and natural gas, and also maintenance of equipment. The Açú Logistic Complex is considered as a

<sup>1</sup> Doutor em Informática pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Professor Adjunto da Universidade Federal Fluminense (UFF). [dalessandrosoares@yahoo.com.br](mailto:dalessandrosoares@yahoo.com.br).

<sup>2</sup> Mestre em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional pela Universidade Candido Mendes (UCAM). Doutorando em Engenharia de Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). [jaimejunior07@gmail.com](mailto:jaimejunior07@gmail.com). O artigo em questão é consequência do trabalho de mestrado deste autor.

<sup>3</sup> Doutor em Ciência da Computação pela UFF. Professor Adjunto da UFF. [emitacc@gmail.com](mailto:emitacc@gmail.com).

<sup>4</sup> Doutora em Ciências Naturais pela UENF. Professora Adjunta da UFF. [marcilenedianin@gmail.com](mailto:marcilenedianin@gmail.com).

study of for thermal design. In order to optimize the object of study, three scenarios were created, each one with 11 different values for power demands of electricity. The proposed model considers two types of thermodynamic cycles: the Rankine cycle and the combined cycle. The test for resolution of a set of problem was conducted using the software Lingo v10. The result has validated the use of the model as an aid to setting up a thermal power plant.

**Descriptors:** Integer linear programming; Operational research; Thermoelectric.

## RESUME

En este trabajo se propone un modelo de programación lineal entera mixta para determinar la cantidad óptima de equipamientos que deberán operar dentro de una termoeléctrica a partir de una demanda de energía eléctrica prevista, visando minimizar los costos de los combustibles de gas natural y de carbón, así como los costos de operación y manutención. Fue considerado como estudio de caso el proyecto de la termoeléctrica del “Complejo Logístico do Açú”. Para optimizar el objeto del sistema en estudio, fueron creados tres escenarios, cada uno con 11 valores diferentes para las demandas de electricidad. El modelo

propuesto considera dos tipos de ciclos termodinámicos: ciclo Rankine y el ciclo combinado. Para la resolución del conjunto de problemas fue utilizada el software Lingo v10. Los resultados obtenidos validan el uso del modelo para auxiliar en la configuración de una termoeléctrica.

**Descritores:** Programación lineal entera; Investigación Operativa; Termoeléctrica.

## 1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento dos sistemas térmicos é necessário devido ao grande número de variáveis e incertezas envolvidas. Em virtude disso, as Usinas Termelétricas necessitam do desenvolvimento de métodos computacionais para mensurar a utilização/conservação energia com as variações de demanda de energia elétrica. (ESPIRITO SANTO, 2001).

Segundo a ANEEL (2013), o Brasil possui no total 1.429 usinas de geração de energia elétrica, onde 1.076 estão em operação, gerando 76.136.364 kW de potência, 110 usinas em construção e outras 243 com sua construção prevista. Das usinas em operação, 618 são termelétricas, representando uma potência de 11.174.321 kW, o que determina

14,68% da potência total. As termelétricas correspondem também a 52 das 110 usinas em construção (62,9% da potência total prevista) e a 82 das 243 usinas outorgadas, representando 59,23% da potência prevista para as mesmas.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de programação matemática para otimizar os custos com combustíveis (carvão e gás natural) e de operação e manutenção dos equipamentos de uma termelétrica, atendendo as necessidades da relação custo/benefício para operação e manutenção do projeto da Usina Termelétrica do Complexo Logístico Porto do Açú.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, serão destacados os trabalhos correlatos mais recentes encontrados na literatura. Dentre eles, destaca-se o trabalho de Nogueira (2004), o qual propõe o desenvolvimento de um novo modelo para dimensionamento de sistemas integrados de energia aplicados a ambientes rurais, a partir da utilização de ferramentas de simulação e otimização desenvolvidas em MATLAB 6.0. O dimensionamento realizado utiliza fontes renováveis locais (hidráulica, solar, eólica e

biomassa) e outras fontes energéticas (eletrificação rural convencional e geração a diesel) e visa minimizar o custo do sistema, mantendo um nível desejado de confiabilidade para o mesmo. A confiabilidade é baseada no conceito de probabilidade de perda de fornecimento de energia à carga (LPSP) para períodos de horas consecutivas. A análise calcula a distância limite para ampliação das redes de distribuição rural e o preço limite do litro do óleo diesel.

Mello (2006) mostra um modelo de despacho para Usinas termelétricas a gás natural considerando a produção e transporte de gás, O modelo Proposto associa a operação do Sistema de geração termelétrica com a operação de redes de gasodutos. A metodologia utilizada para obter a solução foi aplicada a um exemplo com seis usinas termelétricas supridas por uma rede de gás natural. O modelo apresentado integra eficientemente a operação das usinas termelétricas com a operação dos sistemas de gasodutos.

Silva (2007) apresenta um modelo de otimização de uma fábrica desidratadora de forragens localizada na Espanha. O modelo tem função objetivo, com dados históricos de produção (Ton), consumo (kWh) e tempo (h), que retratará o

funcionamento da empresa. Este modelo é obtido por meio de regressão linear múltipla e é implementado utilizando o software Lingo. Os resultados dessa implementação fornecem as horas totais diárias que cada processo deverá ser realizado, juntamente com a quantidade de toneladas de pacotes de feno e grãos, e o custo diário da energia elétrica para realizar a produção.

Costa (2008) apresenta a modelagem de um problema de otimização termoeconômica de plantas de cogeração, visando aliar modernos conceitos econômicos às tecnologias correntes, buscando contemplar suas restrições e inovações através de uma formulação simples. O problema proposto intitula-se problema PCLM – Planta de Cogeração de Lucro Máximo. Nele, um sistema de cogeração é modelado de maneira integrada, tal que sua configuração, as eficiências dos equipamentos envolvidos, os custos de aquisição e operação, as receitas obtidas e as limitações físicas (restrições) levam à determinação de uma função objetivo que represente o valor presente líquido (VPL) do ganho monetário, para o período de operação examinado. O valor ótimo do VPL é obtido e validado através de ferramentas padronizadas dos programas computacionais MATLAB e

Mathematica, para que seja utilizado como referência nos testes de algoritmos de otimização. Outra contribuição desse trabalho é a aplicação de técnicas em seu modelo que tornam os custos de equipamentos compatíveis com a indústria nacional.

Rodrigues (2009) avalia as duas hipóteses para um sistema de cogeração a ser implantado: (i) gerar o máximo de energia elétrica visando à venda do excedente para a concessionária; ou (ii) gerar a energia elétrica somente para consumo próprio, minimizando a compra de energia elétrica da concessionária. A partir destas duas hipóteses desenvolve uma modelagem termodinâmica utilizando o software EES, atendendo a demanda térmica do processo a qual é comparada, mediante uma análise de sensibilidade, os parâmetros financeiros mais influentes na viabilidade econômica da cogeração.

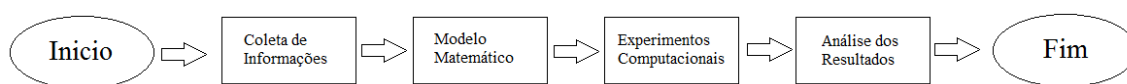
Chaves (2010) faz uma análise do quadro energético brasileiro no âmbito das usinas termelétricas abastecidas por gás natural. Neste aspecto, o autor propõe uma metodologia para estabelecer os custos mínimos de produção, importação e transporte de gás, bem como a máxima geração pelas usinas termelétricas de uma rede interligadas. A metodologia

utilizada para a resolução do modelo é a programação não-linear.

### 3. METODOLOGIA

Neste trabalho é usado um modelo de programação linear inteira mista para determinar a quantidade ótima de equipamentos necessários em uma usina termelétrica a partir de uma

demanda de energia elétrica prevista, de maneira a minimizar os gastos com combustíveis, gás natural e carvão e de operação e manutenção dos equipamentos. Para a apresentação deste modelo matemático de forma a otimizar a termelétrica, considera-se o fluxograma descrito na Figura 1.



**Figura 1-Fluxograma da metodologia adotada.**

Os dados necessários para realização do presente trabalho foram coletados através de: pesquisa na literatura científica; experiência profissional de um dos autores com Turbomáquinas adquirida em 10 anos; e informações obtidas com fabricantes de Turbinas, Caldeira e Geradores.

### 4. Modelo Matemático

Os métodos de Pesquisa Operacional, tradicionalmente empregados na alocação de recursos escassos, são um poderoso recurso para a otimização. A Programação Matemática, especificamente a programação linear inteira, será utilizada para resolver um modelo de fluxo que representará o projeto da termelétrica. O modelo de fluxo é

representado por um grafo  $G(V,A)$  direcionado, no qual  $V$  representa o conjunto de vértices e  $A$  o conjunto de arestas. Os vértices simbolizam os equipamentos e as arestas o fluxo energético (combustíveis, gases de exaustão e vapor).

Uma rede genérica de termelétrica será descrita na Seção 4.1, a qual servirá como base para um melhor entendimento do modelo matemático proposto. Na Seção 4.2 será apresentado o modelo de programação linear inteira mista desenvolvido.

#### 4.1. Rede Genérica de Termelétrica

A Figura 2 mostra a rede genérica escolhida que modela uma termelétrica que funciona com um Ciclo Combinado operando com combustível

gás natural. Foi escolhida esta rede por ser uma rede de simples entendimento e

por apresentar praticamente todos os equipamentos.

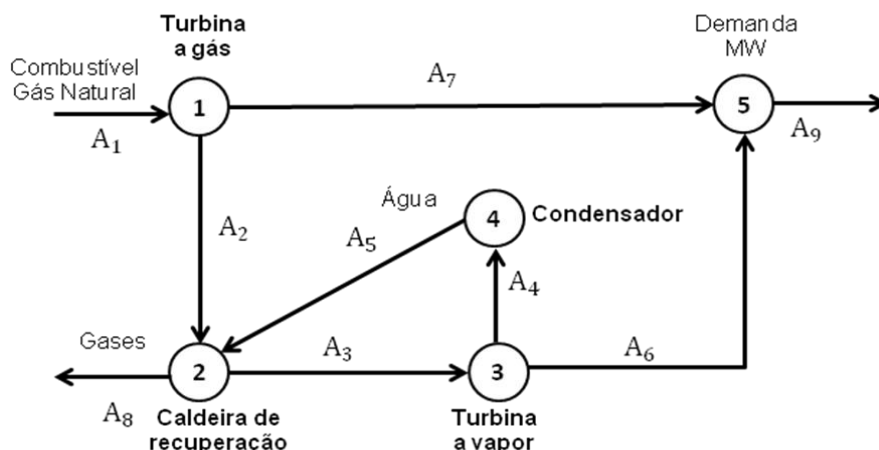


Figura 2-Rede da termelétrica a ciclo combinado.

O gás combustível (aresta  $A_1$ ) entra na turbina a gás (vértice 1) e converte calor em trabalho através da queima de combustível que aciona o gerador elétrico gerando energia elétrica (aresta  $A_7$ ). Os gases de exaustão da turbina a gás (aresta  $A_2$ ) vão para uma caldeira de recuperação (vértice 2) que aquece a água transformando em vapor superaquecido (aresta  $A_3$ ) e por sua vez movimenta a turbina a vapor (vértice 3) que transfere a energia mecânica através de um eixo ao gerador elétrico (aresta  $A_6$ ). Os gases da saída da Turbina a Vapor (aresta  $A_4$ ) vão para o condensador (vértice 4) que resfria o vapor em água (aresta  $A_5$ ) e esta é bombeada para a caldeira de recuperação. A demanda de energia elétrica é o vértice 5 e a saída para os consumidores é a aresta  $A_9$ . Os

equipamentos que compõem este ciclo são ilustrados na Figura 2.

#### 4.2. Modelo de programação linear inteira mista proposto

O modelo matemático proposto neste trabalho permite determinar a quantidade ótima de equipamentos em operação mediante a minimização da soma dos custos de combustível e custos de operação e manutenção dos equipamentos dada uma demanda de carga elétrica em MW fornecida como dado entrada. Os equipamentos podem ser selecionados a partir de dois conjuntos: Ciclo Rankine e Ciclo Combinado. Além de determinar a quantidade de equipamentos necessária, o modelo calcula a potência gerada por cada um dos turbogeradores.

O modelo proposto usará as seguintes variáveis de decisão:

- $y_k$  – variável binária que indica se o ciclo  $k$  está sendo utilizado.
- $m_{ijk}$  – variável linear que representa a quantidade de fluxo energético que passa pela aresta  $(i,j)$  no ciclo  $k$ .

Ao descrever um grafo  $G$   $(V,A)$  associado a rede da termelétrica do Porto do Açú, define-se que os vértices de  $G$  são separados nos seguintes subconjuntos:

- $V_{TG}$  – Vértices que representam Turbinas a gás;
- $V_{TV}$  – Vértices que representam Turbinas a Vapor;
- $V_{TVCC}$  – Vértices que representam Turbinas a Vapor - Ciclo Combinado;
- $V_{CV}$  – Vértices que representam Caldeira a Vapor;
- $V_{CR}$  – Vértices que representam Caldeira de Recuperação;
- $V_{CCC}$  – Vértices que representam Condensador do Ciclo Combinado;

- $V_{CCR}$  – Vértices que representam Condensador do Ciclo Rankine;
- $V_{COMB}$  – Vértices que representam Combustível;
- $V_{ÁGUA}$  – Vértices que representam Água;
- $V_{DEM}$  – Vértices que representam a Demanda de Energia Elétrica;
- $V_{DV}$  – Demais Vértices.

Além disso, destacam-se em  $I$  e  $F$  os vértices iniciais e finais, respectivamente.

Associadas a cada aresta  $j$  do grafo estão as seguintes informações:

- $Min_j$  – Valor mínimo de energia
- $Max_j$  – Valor máximo de energia
- $Ener_j$  – Tipo de fluxo energético
- $Ciclo_j$  – Ciclo a qual pertence a aresta.

Na rede proposta, existem relações específicas entre determinados fluxos de entrada e saída em cada vértice. Denomina-se este tipo de vértice como nó de processamento. A Figura 3 apresenta a Caldeira de Vapor com essas características como exemplo

para equacionar os demais fluxos. Os valores de relação de fluxo da Caldeira a Vapor são equacionados da seguinte forma:

$$A_{1,k}/A_{4,k} = 1/50 \rightarrow 50.A_{1,k} - 1.A_{4,k} = 0 \quad (1)$$

A Equação (1) apresenta a relação de 1 parte de carvão ( $A_{1,k}$ ) para 50 partes de gases de exaustão ( $A_{4,k}$ ).

$$A_{2,k}/A_{3,k} = 1/100 \rightarrow 100.A_{2,k} - 1.A_{3,k} = 0 \quad (2)$$

A Equação (2) apresenta a relação de 1 parte de água ( $A_{2,k}$ ) para 100 partes de vapor AP ( $A_{3,k}$ ).

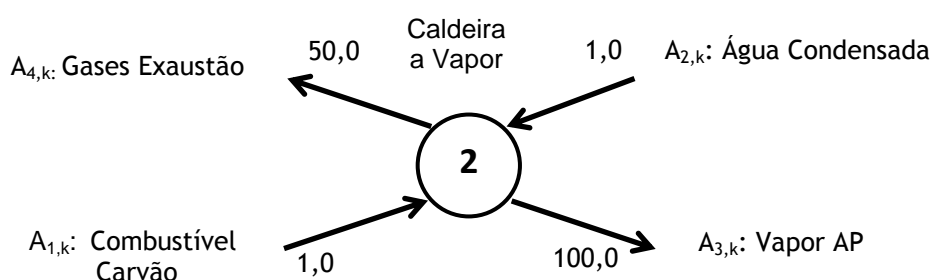


Figura 3-Representação do vértice da Caldeira de Vapor. Fonte: adaptado Jensen (1999).

Descrevendo as Equações (1) e (2) no modelo matemático proposto, têm-se:

$$\sum_{j / Ener(j,i)=Carvão} 50m_{jik} - \sum_{j / Ener(i,j)=Gases} m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{CV}, \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_{j / Ener(j,i)=VaporAP} 100m_{jik} - \sum_{j / Ener(i,j)=Água} m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{CV}, \quad \forall k \quad (4)$$

Sendo assim o modelo de programação linear inteira mista proposto terá como função objetivo a equação (5) e como restrições as equações (6) – (21). A Equação (5)

apresenta a função objetivo que minimiza a soma dos custos de combustível e de operação e manutenção dos ciclos termodinâmicos selecionados.



**Minimizar**

$$\sum_{j / Ener_{(j,i)}=GásNatural} Custo_{-}m_{ijk} + \sum_{j / Ener_{(i,j)}=Carvão} Custo_{-}m_{ijk} + \sum_{j / Ener_{(i,j)}=Ciclo} CustoO \& M \geq 0, \quad \forall i \in Ener_j, \forall k$$

(5)

A Equação (6) a seguir apresenta fluxo no vértice inicial (I) o qual representada a entrada de combustível.

$$\sum_{j / Ener_{(j,i)}=Combustível} m_{ijk} \leq LimiteComb_{Combustível}, \quad \forall k, \quad \forall k Combustível \in \{Gás\_natural, Carvão\}$$

(6)

Na Caldeira a Vapor, há uma relação de 1 parte de carvão (A<sub>1,k</sub>) para 50 partes de gases de exaustão (A<sub>4,k</sub>) e uma relação de 1 parte de água (A<sub>2,k</sub>)

para 100 partes de vapor AP (A<sub>3,k</sub>). Descritas pelas Equações (7) e (8), respectivamente, pelo modelo matemático proposto:

$$\sum_{j / Ener_{(j,i)}=Carvão} 50m_{jik} - \sum_{j / Ener_{(i,j)}=Gases} m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{CV}, \quad \forall k$$

(7)

$$\sum_{j / Ener_{(j,i)}=VaporAP} 100m_{jik} - \sum_{j / Ener_{(i,j)}=Água} m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{CV}, \quad \forall k$$

(8)

Na Turbina a Vapor – cr (Ciclo Rankine), há uma relação de 1 parte de vapor AP (A<sub>1,k</sub>) para 0,33 partes de gases MP (A<sub>4,k</sub>) e uma relação de 1 parte de Vapor AP (A<sub>3,k</sub>) para 3,33

partes de potência elétrica (A<sub>6,k</sub>). Descritas pelas Equações (9) e (10), respectivamente, pelo modelo matemático proposto:

$$\sum_{j / Ener_{(j,i)}=VaporAP} m_{jik} - \sum_{j / Ener_{(i,j)}=VaporMP} 0,33m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{TV}, \quad \forall k$$

(9)

$$\sum_{j / Ener_{(j,i)}=VaporAP} m_{jik} - \sum_{j / Ener_{(i,j)}=Eletricidade} 3,33m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{TV}, \quad \forall k$$

(10)

Na Turbina a Gás, há uma relação de 1 parte de gás natural (A<sub>7,k</sub>) para 10 partes de gases em AP (A<sub>9,k</sub>) e uma relação de 1 parte de gás natural

(A<sub>7,k</sub>) para 3 partes de potência elétrica (A<sub>8,k</sub>). Descritas pelas Equações (11) e (12), respectivamente, pelo modelo matemático proposto:

$$\sum_{j / \text{Ener}_{(j,i)}=\text{GásNatural}} m_{jik} - \sum_{j / \text{Ener}_{(i,j)}=\text{VaporAP}} 10m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{TG}, \quad \forall k$$

(11)

$$\sum_{j / \text{Ener}_{(j,i)}=\text{GásNatural}} m_{jik} - \sum_{j / \text{Ener}_{(i,j)}=\text{Eletricidade}} 3m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{TG}, \quad \forall k$$

(12)

Na Caldeira de Recuperação, há uma relação de 1 parte de água (A<sub>10,k</sub>) para 100 vapor MP (A<sub>11,k</sub>) e uma relação de 1 parte de gases AP (A<sub>9,k</sub>)

para 0,12 partes de gases de exaustão (A<sub>12,k</sub>). Descritas pelas Equações (13) e (14), respectivamente, pelo modelo matemático proposto:

$$\sum_{j / \text{Ener}_{(j,i)}=\text{Água}} m_{jik} - \sum_{j / \text{Ener}_{(i,j)}=\text{VaporMP}} 100m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{CR}, \quad \forall k$$

(13)

$$\sum_{j / \text{Ener}_{(j,i)}=\text{GasesAP}} m_{jik} - \sum_{j / \text{Ener}_{(i,j)}=\text{GasesExaustão}} 0,12m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{CR}, \quad \forall k$$

(14)

Na Turbina a Vapor cc (Ciclo Combinado), há uma relação de 1 parte de vapor MP (A<sub>11,k</sub>) para 3 partes de eletricidade (A<sub>14,k</sub>) e uma relação de 1 parte de vapor MP (A<sub>11,k</sub>) para 0,1

partes de vapor BP (A<sub>13,k</sub>). Descritas pelas Equações (15) e (16), respectivamente, pelo modelo matemático proposto:

$$\sum_{j / \text{Ener}_{(j,i)}=\text{VaporMP}} m_{jik} - \sum_{j / \text{Ener}_{(i,j)}=\text{Eletricidade}} 3m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{TVCC}, \quad \forall k$$

$$\sum_{j / \text{Ener}_{(j,i)}=\text{VaporMP}} m_{jik} - \sum_{j / \text{Ener}_{(i,j)}=\text{VaporBP}} 0,1m_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_{TVCC}, \quad \forall k$$

(16)

A Equação (17) apresenta o fluxo no vértice final (F) o qual representa a demanda de Energia Elétrica.

$$\sum_{j / \text{Ener}_{(j,i)}=\text{Eletricidade}} m_{jFk} = \text{Eletricidade\_Solicitada}, \quad \forall k$$

(17)

A Equação (18) apresenta os fluxos nos demais vértices.

$$\sum_{j \in Ener(j,i)} m_{jik} - \sum_{j \in Ener(i,j)} m_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in V_{DV}, \forall k$$

(18)

As Equações (19) e (20) apresenta os valores mínimos e máximos dos vértices.

$$m_{ijk} \geq Min_j, \quad \forall i \in Ener_j, Min_j \cdot y_k,$$

(19)

$$m_{ijk} \leq Max_j, \quad \forall i \in Ener_j, Max_j \cdot y_k,$$

(20)

A Equação (21) apresenta as arestas associadas a cada tipo de ciclo que garante a ativação do ciclo selecionado.

$$m_{ijk} \leq Max_j \cdot y_k, \quad \forall i \in Ener_j, \quad \forall k$$

(21)

## 5. Estudo de Caso: Modelagem Matemática da Usina Termelétrica do Porto do Açú

A usina termelétrica objeto do presente estudo será modelada mediante uma rede generalizada. Nessa rede, os vértices representam equipamentos dos ciclos Rankine e Combinado e as arestas representam os diferentes fluxos entre esses equipamentos, tais como: combustível, vapor, gás de exaustão, água e eletricidade.

Segundo a MPX, empresa de energia que faz parte do grupo EBX, a primeira fase de implementação da (UTE) será com combustível a carvão mineral e potência instalada de 2100 MW. Para esta primeira fase,

considerou-se 21 Ciclos Rankine de 100 MW. Já a segunda fase será implementada com combustível gás natural e potência instalada de 3300 MW, considerando 5 unidades de 660 MW. Nesta fase, considera-se cada unidade com 4 turbinas a gás de 110 MW e 4 Turbinas a Vapor de 55 MW. Portanto, a configuração adotada para a UTE considera um total de 21 turbinas a vapor de 100MW para Ciclos Rankine, 20 turbinas a gás de 110 MW e 20 turbinas a vapor de 55 MW nos Ciclos Combinado.

A Figura 4 mostra a rede proposta para modelar a Termelétrica do Açú, na qual apresenta-se a integração entre os ciclos Rankine e

Combinado. Como mencionado anteriormente, o modelo proposto compreende 21 ciclos Rankine e 20 ciclos Combinados. A rede proposta corresponde a um multigrafo, onde cada vértice representa a um conjunto de equipamentos do mesmo tipo e ciclo. Por exemplo, o vértice 2, representa o conjunto de 20 caldeiras a vapor do ciclo Rankine. Já cada aresta do grafo, representa o conjunto de arestas entre dois conjuntos de equipamentos. Por

exemplo, a aresta  $A_{3,k}$ , representa o conjunto de  $k$  arestas entre o vértice 2 (conjunto Caldeira a Vapor) e o vértice 3 (conjunto Turbina a Vapor). Portanto, cada aresta conecta um par de equipamentos. Na notação da aresta, o primeiro índice denota o tipo de conexão (p.e. Caldeira a Vapor-Turbina Vapor) e o segundo índice  $k$  denota o número do conjunto, onde  $k=1,\dots,41$ . A rede apresenta diversos fluxos de entrada e saída nos vértice.

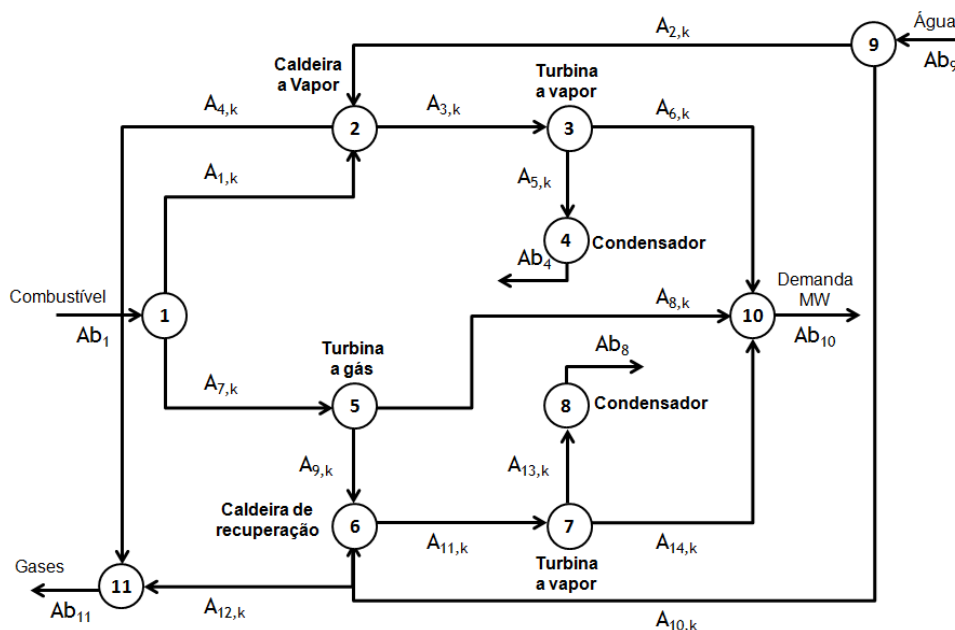


Figura 4-Integração dos ciclos Rankine e Combinado

## 6. Experimentos Computacionais E Resultados Obtidos

A Tabela 2 apresenta três cenários diferentes, os quais foram definidos para testar e validar o modelo proposto. Com base nestes cenários, foram consideradas variações na demanda de energia elétrica entre

500MW e 5400MW em incrementos de 500MW. Isso resulta em 11 problemas teste em cada cenário. O conjunto de problemas teste compreende assim 33 problemas.

TABELA 2 – Dados usados na definição dos cenários de teste.

| Cenário | Custos e Combustível (R\$) |             | Custos de Operação e Manutenção (R\$) |                 |
|---------|----------------------------|-------------|---------------------------------------|-----------------|
|         | Carvão                     | Gás Natural | Ciclo Rankine                         | Ciclo Combinado |
| 1       | 200                        | 700         | 8.000                                 | 19.000          |
| 2       | 300                        | 500         | 10.000                                | 12.000          |
| 3       | 400                        | 600         | 13.000                                | 17.000          |

A resolução do conjunto foi realizada no software LINGO v10, avaliando-se o seu desempenho computacional e a possível necessidade do uso de heurísticas. O Computador usado tem processador Intel 1,86 GHz, 1 GB de memória RAM DDR2 e 160 GB de HD. O desempenho do modelo proposto foi avaliado para cada um dos cenários. A Figura 5 mostra o desempenho computacional na resolução dos problemas em cada

cenário. Observa-se que o tempo de resolução do modelo é influenciado pelo valor da demanda em MW especificada, sendo que para valores de demanda intermediários, o tempo de resolução aumenta. Observa-se que à medida que a diferença entre os parâmetros dos modelos diminui, o modelo fica mais difícil de ser resolvido. O tempo de resolução de cada teste não excedeu 10 minutos.

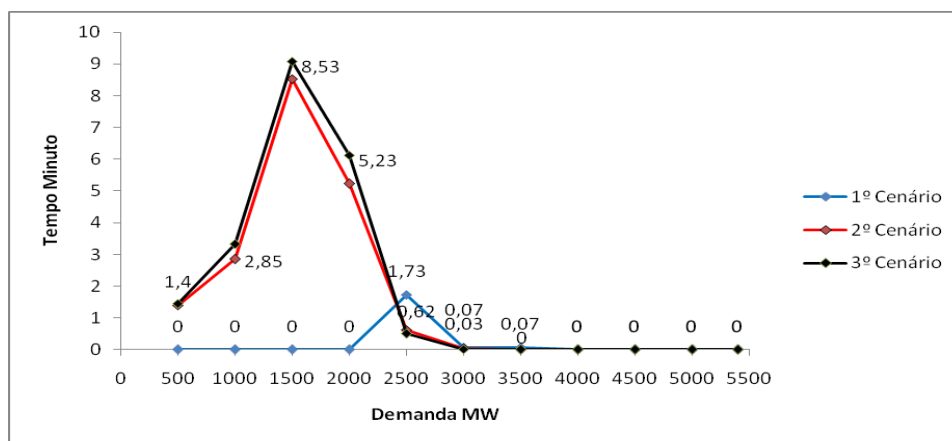


Figura 5-Desempenho Computacional com Relação à Demanda para os 3 Cenários.

A Tabela 3 mostra os resultados para os três cenários considerando-se uma demanda de 2500 MW. No primeiro cenário, observa-se que foram selecionados todos os conjuntos de equipamentos do ciclo Rankine

(conjuntos 1 a 21) e ainda foi necessário selecionar três conjuntos combinados para garantir a demanda de 2500MW. Já nos outros dois cenários, a melhor solução consiste em selecionar 16 conjuntos de equipamentos do ciclo

combinado. Em ambos os casos, define-se que 9 turbogeradores TG-2 funcionem com capacidade máxima de 100MW e 7 turbogeradores TG-2 funcionem com capacidade de 90MW.

### 7. Considerações Finais

Neste trabalho foi proposto um modelo de programação linear inteira mista que permite determinar a quantidade ótima de equipamentos em operação, segundo uma demanda de energia elétrica especificada em MW,

considerando todos os equipamentos disponíveis. Este modelo foi dimensionado para o estudo do projeto da termelétrica do complexo logístico do Açú. Os custos da Usina Termelétrica podem ser estimados mediante o modelo e espera-se que permita otimizar o seu funcionamento produzindo importantes economias nos custos de combustível, operação e manutenção.

**TABELA 3** – Equipamentos Selecionados nos Três Cenários – Demanda de 2500MW.

| Cenário 1 |      |      |      | Cenário 2 |      |      | Cenário 3 |      |      |
|-----------|------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| Conj.     | TG-1 | TG-2 | TG-3 | Conj.     | TG-2 | TG-3 | Conj.     | TG-2 | TG-3 |
| 1         | 100  | -    | -    | 22        | 110  | 55   | 23        | 110  | 55   |
| 2         | 100  | -    | -    | 23        | 110  | 55   | 24        | 110  | 55   |
| 3         | 100  | -    | -    | 24        | 110  | 55   | 25        | 90   | 55   |
| 4         | 100  | -    | -    | 26        | 110  | 55   | 26        | 110  | 55   |
| 5         | 65   | -    | -    | 27        | 110  | 55   | 27        | 90   | 55   |
| 6         | 100  | -    | -    | 28        | 110  | 55   | 28        | 90   | 55   |
| 7         | 100  | -    | -    | 29        | 110  | 55   | 29        | 90   | 55   |
| 8         | 100  | -    | -    | 31        | 110  | 55   | 31        | 90   | 55   |
| 9         | 100  | -    | -    | 32        | 110  | 55   | 32        | 90   | 55   |
| 10        | 100  | -    | -    | 34        | 90   | 55   | 34        | 90   | 55   |
| 11        | 100  | -    | -    | 35        | 90   | 55   | 35        | 110  | 55   |
| 12        | 100  | -    | -    | 37        | 90   | 55   | 37        | 110  | 55   |
| 13        | 100  | -    | -    | 38        | 90   | 55   | 38        | 110  | 55   |
| 14        | 100  | -    | -    | 39        | 90   | 55   | 39        | 110  | 55   |
| 15        | 100  | -    | -    | 40        | 90   | 55   | 40        | 110  | 55   |
| 16        | 100  | -    | -    | 41        | 90   | 55   | 41        | 110  | 55   |
| 17        | 100  | -    | -    | -         | -    | -    | -         | -    | -    |
| 18        | 100  | -    | -    | -         | -    | -    | -         | -    | -    |
| 19        | 100  | -    | -    | -         | -    | -    | -         | -    | -    |
| 20        | 100  | -    | -    | -         | -    | -    | -         | -    | -    |
| 21        | 100  | -    | -    | -         | -    | -    | -         | -    | -    |
| 35        | -    | 90   | 55   | -         | -    | -    | -         | -    | -    |
| 40        | -    | 90   | 55   | -         | -    | -    | -         | -    | -    |
| 41        | -    | 90   | 55   | -         | -    | -    | -         | -    | -    |

A metodologia adotada consistiu em simular e resolver diferentes configurações de cenários com variações nos custos de combustível, operação e manutenção e nas demandas de energia elétrica. Essa metodologia mostrou-se válida e suficientemente flexível para auxiliar no processo de configuração de uma Usina Termelétrica. Em termos de desempenho, embora o modelo seja do tipo inteiro misto, foi possível resolver os casos de estudo em tempo aceitável. O *solver* do LINGO v10 consome mais tempo para resolver os casos com valores de demanda mediana. Já nos casos com valores de demanda mínima e máxima o tempo de execução é pequeno. O presente trabalho ainda será aprimorado através de estudos de caso mais rígidos e em situações críticas, podendo servir para a tomada de decisão de quais equipamentos a serem operados com a potência gerada a partir da demanda de carga elétrica especificada, de forma rápida, segura e versátil.

## REFERÊNCIAS

1. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. *Gás Natural*. ([www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br), 3, 2013).
2. CHAVES, F.S. *Otimização da Operação da Rede de Gás Natural para Suprimento das Termelétricas por Programação Não Linear*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica. Politécnica Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
3. COSTA, A.N. *Otimização da Lucratividade de Plantas de Cogeração: Modelagem do Problema PCLM*, Dissertação de Mestrado em Eng. Mecânica. UFRJ, 2008.
4. JENSEN, P. Network, *University of Texas*, 1999 ([me.utexas.edu/~jensen/models](http://me.utexas.edu/~jensen/models), 11, 2011).
5. KEHLHOFER, R. H.; BACHMANN, R.; NIELSEN, H.; WARNER, J. *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*. Tulsa: PennWell Publishing Company, 1999. 298 p. Lora; Nascimento. *Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e operação*. Rio de Janeiro: Ed. Interciências, 2004.
6. MELLO, O.D. *Despacho Integrado da Geração Termelétrica e da Produção e Transmissão de Gás Natural*, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Campinas, SP, Universidade Estadual de Campinas Unicamp, 2006.
7. MPX, Empresa de Energia do Grupo EBX, Disponível em: <[www.mpx.com.br](http://www.mpx.com.br)>. Acesso em: 2 de setembro 2011.

- 8. NOGUEIRA, C.E.C.**  
*Dimensionamento de Sistemas Integrados de Energia em Ambientes Rurais*, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Florianópolis, SC, Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, 2004.
  
- 9. RODRIGUES, M.L.M.** *Estudo Técnico Econômico da Implantação da Cogeração em Pequena Escala a Biomassa em uma Indústria*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas, PUC-Minas, 2009.
  
- 10. SILVA, M.V.** *Um Modelo Matemático para Estudo de Otimização do Consumo de Energia Elétrica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Ilha Solteira, SP, Universidade do Estado de São Paulo. UNESP, 2007.
  
- 11. SOUSA JUNIOR, J.B.**, Relatório de Estágio sobre Turbogeneradores da Rolls-Royce. Monografia de Engenharia de Produção. Campos, RJ, Universidade Salgado de Oliveira. UNIVERSO, 2009.

Sources of funding: No  
Conflict of interest: No  
Date of first submission: 2015-02-09  
Last received: 2015-02-09  
Accepted: 2015-02-10  
Publishing: 2015-04-31