

A Disponibilidade Global da Planta de Geração Distribuída na Análise de Viabilidade Econômica e Financeira

E. M. Flores – USP, M. R. Gouvea – USP, C. M. V. Tahan - USP

E-mail: edson@bandeirante.com.br

Palavras-Chave – Disponibilidade e viabilidade de plantas de geração distribuída.

Resumo - O modelo desenvolvido é aplicável a plantas de geração distribuída, inclusive cogeração, conectadas ou não à rede de distribuição e transmissão de energia elétrica, porém não despachadas por órgãos centralizados do sistema interligado, como o ONS no Brasil.

O tratamento analítico utilizado no modelo depende do entendimento detalhado da planta, ou seja, da exploração do sistema como um todo, incluindo as disponibilidades dos componentes que estão aquém e além do grupo gerador e que, na falta de alternativas em paralelo para atender as contingências dos componentes principais, influem diretamente na disponibilidade da planta.

Cada sistema tem uma configuração particular. Um Sistema de geração distribuída bem simples pode ser composto, por exemplo, por três grupos motogeradores, sem nenhum aproveitamento da energia térmica. Nesse caso, importa saber as disponibilidades do combustível, do motor em si, incluindo auxiliares, do gerador e do sistema elétrico pós-gerador, incluindo transformador, demais equipamentos de conexão e a própria rede elétrica local.

Uma configuração mais complicada pode incluir, por exemplo, a capacidade máxima do modelo, em um ciclo combinado com cogeração de energia elétrica.

Destaca-se, ainda, que os resultados decorrentes do modelo, não são apenas as disponibilidades globais das plantas. Mais do que isso, diferentes níveis opcionais de disponibilidade são apresentados, podendo resultar em maiores ou menores dispêndios em energia de backup e, por conseguinte, favorecer ou dificultar a viabilidade econômica do projeto.

Os resultados, da forma como comentado acima, são apresentados, no caso de cogeração de energia elétrica e térmica, também para o vapor e para os gases quentes gerados pela planta. Essa maior amplitude e complexidade do modelo fornecem subsídios refinados para os estudos de viabilidade econômica em projetos de cogeração de energia.

É claro que a disponibilidade das plantas é o ponto central do modelo, mas os resultados não ficam apenas nisso. A partir dessas disponibilidades e da curva de carga da demanda local de energia elétrica, determina-se

a curva de carga da energia de backup, da energia suplementar a ser adquirida do sistema interligado para atendimento das necessidades locais e da energia excedente a ser comercializada com a concessionária local ou terceiros. Essas curvas são importantes, na medida em que a energia elétrica, em um quadro de mercado livre, deverá ter o seu preço cada vez mais diferenciado nos diferentes horários do dia e de acordo com os dias da semana.

Todos os resultados acima mencionados, devidamente valorizados pelos preços praticados no mercado para a energia elétrica, vapor e gases quentes, de acordo com as variações das curvas de carga, permitem uma melhor estimativa da receita líquida para o projeto e uma melhor avaliação da viabilidade do mesmo.

Mas o modelo vai mais longe. Ao facilitar o cálculo das disponibilidades e das estimativas de receitas e despesas, envolvendo a energia excedente, suplementar e de backup, vapor e gases quentes, permite, também, fazer simulações com variado número de grupos geradores, caldeiras ou outros equipamentos e, a partir daí, verificar os efeitos na viabilidade econômica, levando em consideração as variações nos custos dos equipamentos, nas despesas de operação e manutenção e nas despesas com combustíveis.

1. OTIMIZAÇÃO DO CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE GLOBAL DA PLANTA

1.1. Modelagem para o Cálculo da Disponibilidade

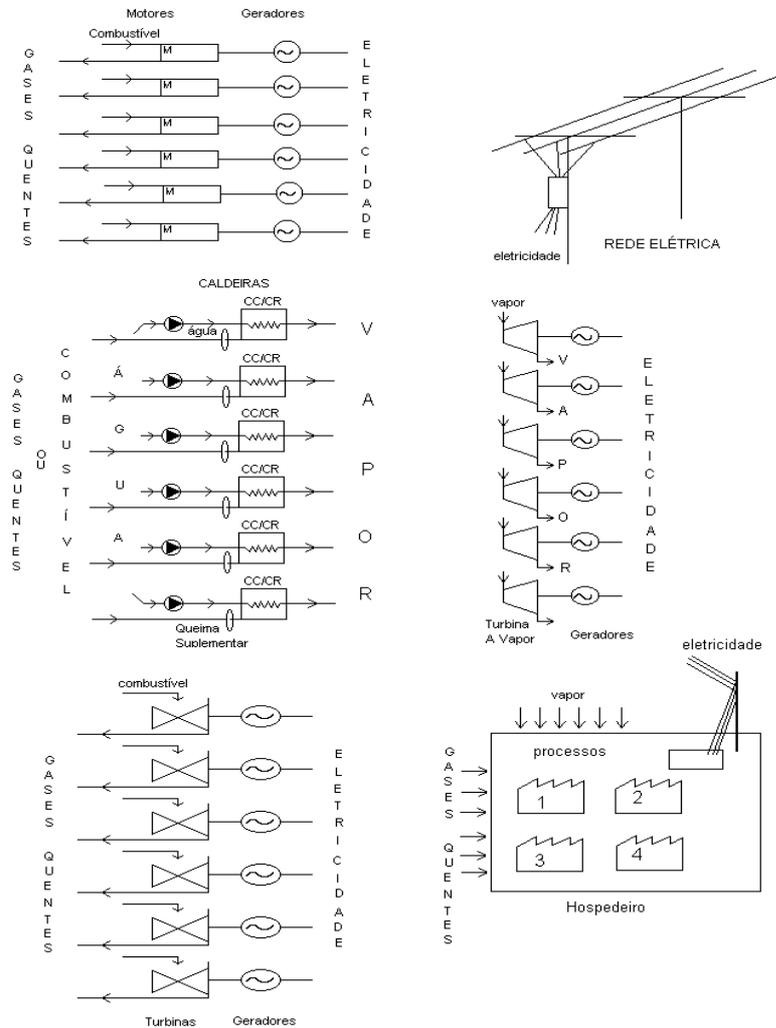
A proposta do modelo é permitir a otimização dos estudos de viabilidade econômica, a partir do cálculo refinado das disponibilidades de energia elétrica e vapor e do cálculo da receita operacional líquida decorrente dessas disponibilidades, qualquer que seja a configuração do sistema de geração decorrente da combinação entre os grupos acima representados.

Para a formulação do modelo, o sistema de geração distribuída, incluindo a cogeração, foi dividido em grupos, quais sejam: grupos de até seis geradores acionados por motores à combustão, grupos de até seis geradores acionados por turbinas a gás, grupos de até seis geradores acionados por turbinas a vapor, grupos de até seis caldeiras, entre caldeiras de recuperação e convencionais, grupos de até quatro processos industriais,

comerciais ou residenciais independentes que consomam vapor ou gases quentes e rede elétrica da concessionária

de distribuição ou transmissão de energia elétrica, conforme segue (Figura 1):

FIGURA 1



Uma determinada configuração pode incluir, por exemplo, a capacidade máxima do modelo, em um ciclo combinado com cogeração de energia elétrica. Nesse caso, poderíamos ter doze grupos geradores, quatro movidos por motores a combustão, dois movidos por turbinas a gás e seis movidos por turbinas a vapor, resultando $2^{12}=4096$ combinações possíveis de grupos geradores que, a qualquer momento, podem estar em operação ou fora de operação. Por exemplo, a primeira combinação possível é aquela em que todos os grupos geradores estão em operação, depois temos as alternativas de um grupo fora de operação, que pode ser qualquer um dos doze, portanto mais doze combinações possíveis e, assim, por diante.

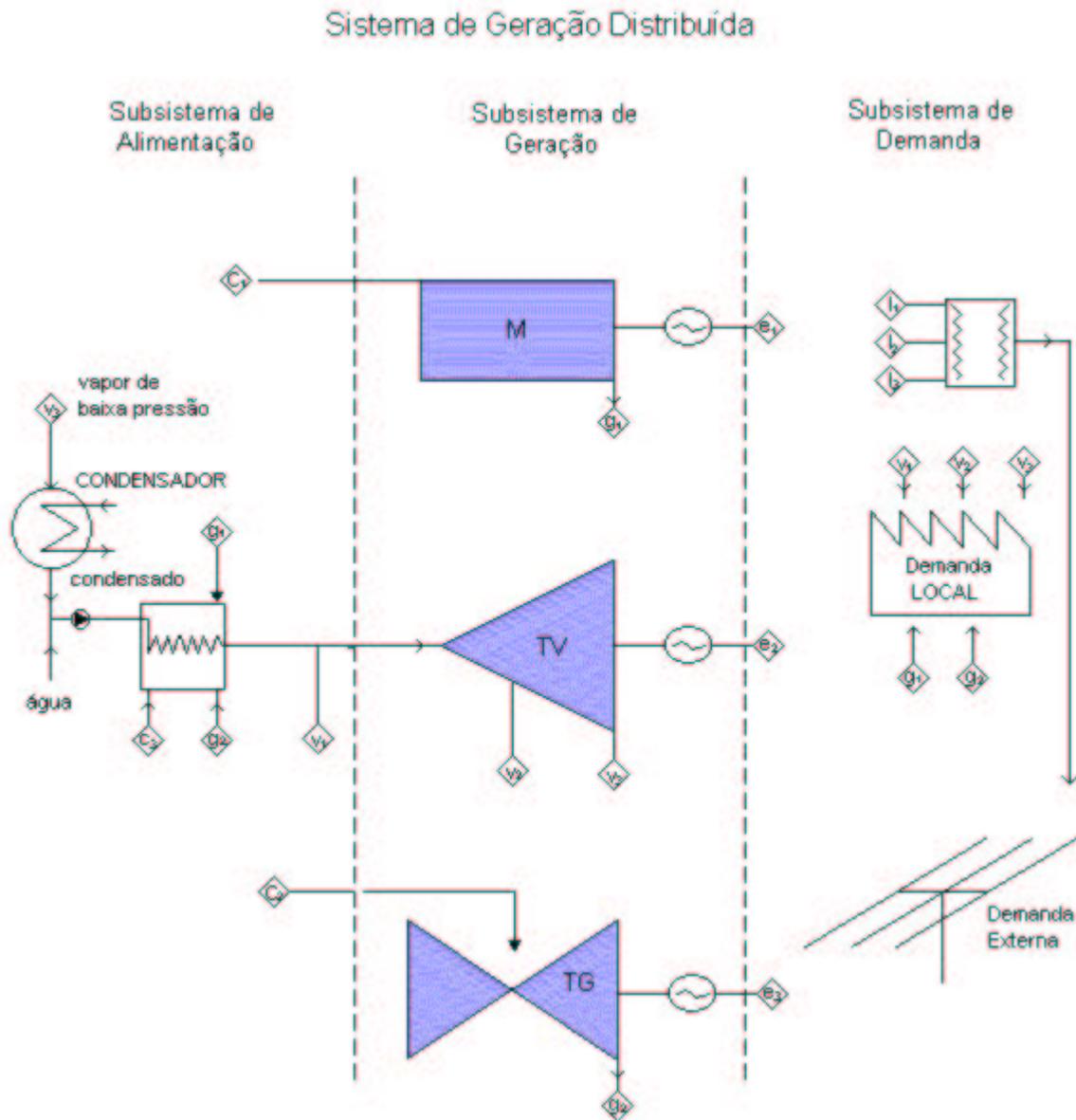
Além das combinações possíveis de até seis caldeiras de recuperação, recebendo gases quentes dos grupos geradores e fornecendo vapor para uma ou várias turbinas

a vapor ou para o máximo de quatro processos industriais, comerciais e/ou residenciais independentes.

Se uma turbina a vapor é alimentada a partir de seis caldeiras em proporções diferentes, isso deve ser considerado e a disponibilidade da alimentação da turbina a vapor resultará das combinações possíveis das caldeiras em operação e fora de operação, de acordo com a proporção que cada uma fornece de vapor, considerando-se, ainda, a possibilidade de que as caldeiras tenham disponibilidades individuais diferentes.

Basicamente, temos um subsistema formado pelos grupos de geradores no centro do sistema, um subsistema de alimentação, que antecede o subsistema de geração, e um subsistema de demanda, variando os tipos, o número de equipamentos e a combinação entre eles (Figura 2):

FIGURA 2



O subsistema de geração é composto por motores e turbinas a gás, que recebem combustíveis diretamente de uma fonte externa, geram eletricidade e fornecem gases quentes para as caldeiras de recuperação ou, diretamente, para o subsistema de demanda. Compõe, ainda, o subsistema de geração as turbinas a vapor que recebem vapor das caldeiras de recuperação-CR e/ou das caldeiras convencionais-CC, geram energia elétrica e, também podem fornecer vapor para o subsistema de demanda, através da extração de vapor em vários níveis de pressão.

1.2. Subsistema de alimentação

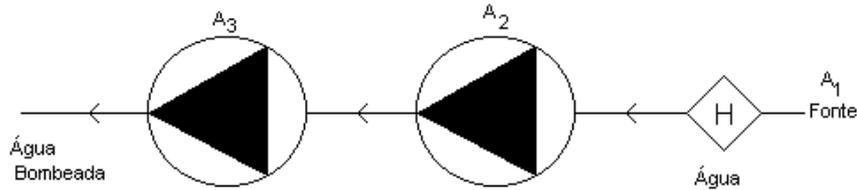
No subsistema de alimentação do modelo que está sendo descrito, pode-se ter até 6 caldeiras, entre caldeiras convencionais e de recuperação, que fornecem vapor para

as turbinas a vapor ou diretamente para o subsistema de demanda e que são alimentadas com gases quentes provenientes dos motores e turbinas a gás e água/condensado/combustível direto, quando se tratar de caldeira convencional.

Seja “r” o número de caldeiras de recuperação e “c” o número de caldeiras convencionais, então, deve-se ter: $r \leq 6$, $c \leq 6$ e $r + c \leq 6$, onde r e c variam de 0 a 6.

A água e os condensados chegam na caldeira através de bombas de alimentação e, portanto, as suas disponibilidades dependem da disponibilidade da água ou condensado na fonte e das disponibilidades das bombas dispostas em série ou em paralelo (Figura 3).

FIGURA 3



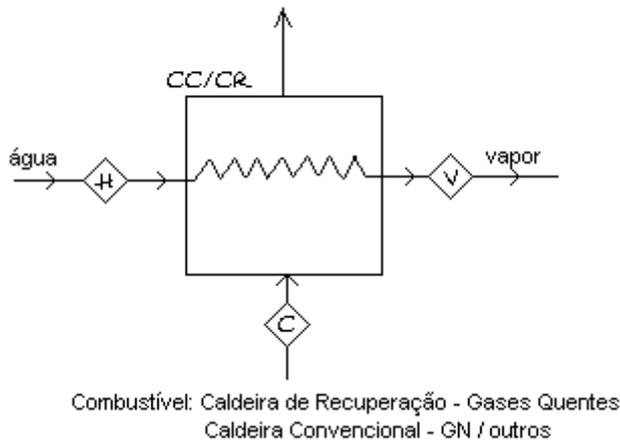
Exemplo: seja A_1 a disponibilidade da água ou condensado na fonte e A_2 e A_3 as disponibilidades de duas bombas em série. Supondo-se a não existência de um circuito de alimentação alternativo para contingências, a disponibilidade resultante de alimentação das caldeiras será:

$$A_a = A_1 \times A_2 \times A_3.$$

Se as duas bombas acima estiverem dispostas em paralelo e a capacidade de cada uma individualmente for suficiente para a alimentação da caldeira, então a disponibilidade resultante de alimentação da caldeira será:

$$A_a = A_1 \times [1 - (1 - A_2) \times (1 - A_3)].$$

FIGURA 4



A disponibilidade do vapor gerado pela caldeira será: $A_v = A_a \times A_c \times A_e$, onde A_e é a disponibilidade do combustível da caldeira ou do gás quente proveniente de motores ou turbinas a gás.

Se tivermos seis caldeiras, máximo suportado pelo modelo que estamos apresentando, então, a disponibilidade resultante para o vapor de cada caldeira será dada, conforme tabela 1:

Com relação à alimentação de combustível de motores,

turbinas a gás e caldeiras, pode-se considerar uma disponibilidade de 100%, no caso de estoques intermediários de combustível no local, mas no caso de alimentação contínua por gasoduto, "just in time" ou, ainda, combustível derivado diretamente do processo de produção local, como o licor negro, pode-se ter que considerar a disponibilidade do processo ou a disponibilidade garantida pelo fornecedor e, também, a disponibilidade dos compressores de gás no local, quando o gás não for entregue na pressão requerida pelo sistema de geração.

TABELA 1
DISPONIBILIDADE DO VAPOR

CALDEIRAS	DISPONIBILIDADES			
	ÁGUA/ CONDENS.	GASES/ COMBUST.	CALDEIRA	VAPOR
1	A_{a1}	A_{e1}	A_{c1}	$A_{v1} = A_{a1} \times A_{e1} \times A_{c1}$
2	A_{a2}	A_{e2}	A_{c2}	$A_{v2} = A_{a2} \times A_{e2} \times A_{c2}$
3	A_{a3}	A_{e3}	A_{c3}	$A_{v3} = A_{a3} \times A_{e3} \times A_{c3}$
4	A_{a4}	A_{e4}	A_{c4}	$A_{v4} = A_{a4} \times A_{e4} \times A_{c4}$
5	A_{a5}	A_{e5}	A_{c5}	$A_{v5} = A_{a5} \times A_{e5} \times A_{c5}$
6	A_{a6}	A_{e6}	A_{c6}	$A_{v6} = A_{a6} \times A_{e6} \times A_{c6}$

A disponibilidade dos gases quentes para a caldeira de recuperação apresenta maior complexidade de cálculo, haja vista que uma mesma caldeira pode receber gases quentes de até seis grupos geradores, entre motores e turbinas. Nesse caso, a disponibilidade é calculada considerando-se as várias combinações possíveis de motores e turbinas em operação e fora de operação, em um total de $2^6 = 64$ combinações possíveis. Se todos os motores e turbinas tivessem a mesma disponibilidade, tal cálculo seria bastante facilitado, pela possibilidade de aplicação da fórmula da Distribuição Binomial, ou seja, a probabilidade de “x” grupos geradores fora de operação seria dada por:

$$P(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, \text{ onde "n" é o n}^\circ \text{ total de}$$

grupos geradores, “x” o número de grupos geradores fora de operação e p é a indisponibilidade de cada um dos grupos geradores. Porém, como as disponibilidades podem ser diferentes, então há que se calcular tais probabilidades pelo uso de uma matriz com todas as 64 combinações possíveis, conforme segue:

Vamos supor que a disponibilidade de cada grupo gerador seja A_i com i variando de 1 até 6. A matriz pode ser construída, então, com a primeira linha representando a situação onde não se tem nenhum grupo gerador fora de operação, conforme segue:

$A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ A_6$ Probabilidade $P(x=0) = \prod_1^6 A_i$, ou seja, esta é a probabilidade de nenhum grupo gerador fora de operação. Seguem-se, então seis linhas da matriz onde pode se ter qualquer um dos seis grupos geradores fora de operação:

$$(1-A_1) \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ A_6$$

Probabilidade = $(1-A_1) \prod_2^6 A_i$, ou seja, esta é a probabilidade do primeiro grupo gerador estar fora de operação e os demais estarem em operação.

Similarmente, pode-se calcular as probabilidades das demais linhas da matriz, para um grupo gerador fora de operação:

$$\begin{matrix} A_1 & (1-A_2) & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \\ A_1 & A_2 & (1-A_3) & A_4 & A_5 & A_6 \\ A_1 & A_2 & A_3 & (1-A_4) & A_5 & A_6 \\ A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & (1-A_5) & A_6 \\ A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & (1-A_6) \end{matrix}$$

A soma das probabilidades para cada linha acima resultará na probabilidade de um grupo gerador fora de operação:

$$P(x=1) = \sum_{j=1}^6 \left[(1-A_j) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^6 A_i \right]$$

De modo similar, determinam-se as demais linhas da matriz e as probabilidades de 2, 3, 4, 5 e 6 grupos geradores fora de operação.

Se cada motor ou turbina fornecesse a mesma quantidade de gases quentes para a caldeira, então a disponibilidade de gases quentes seria:

$$A_e = \sum_{k=0}^5 \left[\frac{6-k}{6} \times P(x=k) \right]$$

Como podemos ter cada grupo gerador fornecendo um percentual diferente de gases quentes para a caldeira, então a disponibilidade de gases quentes A_g será a somatória do produto das probabilidades de cada linha da

matriz 64×6, acima referida, pelo correspondente percentual de gases disponível para aquela combinação de grupos geradores em operação e fora de operação.

Devemos observar, ainda, que se tivermos seis caldeiras de recuperação recebendo gases quentes dos seis grupos geradores, então, teremos seis matrizes com dimensão 64×6.

Outras dimensões, também, são possíveis. Por exemplo, se tivermos 2 caldeiras e quatro grupos geradores, sendo que a primeira caldeira esteja recebendo 40% de gases do

motor 1 e 60% do motor 2 e a segunda esteja recebendo 20% do motor 2, 30% da turbina 1 e 50% da turbina 4, então, teremos uma matriz de 4×2 (Tabela 2) e outra de 8×3 (Tabela 3), para o cálculo das disponibilidades de gases quentes.

Vamos supor as seguintes disponibilidades:

Motor 1: A_1 Turbina 1: A_3
 Motor 2: A_2 Turbina 2: A_4

TABELA 2
 DISPONIBILIDADE DOS GASES QUENTES PARA A 1ª CALDEIRA
 Matriz de 4×2

MATRIZ 4×2		DISPONIBILIDADE CONJUNTA	%	DISPONIBILIDADE CONJUNTA PONDERADA
A_1	A_2	$A_1 \times A_2$	1	$1 \times A_1 \times A_2$
A_1	$(1-A_2)$	$A_1 \times (1-A_2)$	0,4	$0,4 \times A_1 \times (1-A_2)$
$(1-A_1)$	A_2	$(1-A_1) \times A_2$	0,6	$0,6 \times (1-A_1) \times A_2$
$(1-A_1)$	$(1-A_2)$	$(1-A_1) \times (1-A_2)$	0	$0 \times (1-A_1) \times (1-A_2)$

$A_{e1} = 1 \times A_1 \times A_2 + 0,4 \times A_1 \times (1-A_2) + 0,6 \times (1-A_1) \times A_2 + 0 \times (1-A_1) \times (1-A_2)$, é a disponibilidade conjunta ponderada de gases quentes resultante para a 1ª caldeira.

TABELA 3
 DISPONIBILIDADE DOS GASES QUENTES PARA A 2ª CALDEIRA
 Matriz de 8×3

MATRIZ 8×3			DISPONIBILIDADE CONJUNTA	%	DISPONIBILIDADE CONJUNTA PONDERADA
A_2	A_3	A_4	$A_2 \times A_3 \times A_4$	1	$1 \times A_2 \times A_3 \times A_4$
A_2	A_3	$(1-A_4)$	$A_2 \times A_3 \times (1-A_4)$	0,5	$0,5 \times A_2 \times A_3 \times (1-A_4)$
A_2	$(1-A_3)$	A_4	$A_2 \times (1-A_3) \times A_4$	0,7	$0,7 \times A_2 \times (1-A_3) \times A_4$
A_2	$(1-A_3)$	$(1-A_4)$	$A_2 \times (1-A_3) \times (1-A_4)$	0,2	$0,2 \times A_2 \times (1-A_3) \times (1-A_4)$
$(1-A_2)$	A_3	A_4	$(1-A_2) \times A_3 \times A_4$	0,8	$0,8 \times (1-A_2) \times A_3 \times A_4$
$(1-A_2)$	A_3	$(1-A_4)$	$(1-A_2) \times A_3 \times (1-A_4)$	0,3	$0,3 \times (1-A_2) \times A_3 \times (1-A_4)$
$(1-A_2)$	$(1-A_3)$	A_4	$(1-A_2) \times (1-A_3) \times A_4$	0,5	$0,5 \times (1-A_2) \times (1-A_3) \times A_4$
$(1-A_2)$	$(1-A_3)$	$(1-A_4)$	$(1-A_2) \times (1-A_3) \times (1-A_4)$	0	$0 \times (1-A_2) \times (1-A_3) \times (1-A_4)$

A_{e2} = Somatória da última coluna da matriz acima é a disponibilidade conjunta ponderada de gases quentes para a 2ª caldeira

TABELA 4
EXEMPLOS DE DISPONIBILIDADES DOS GASES QUENTES
Exemplo de matriz 8 × 3

MATRIZ 8×3			DISPONIBILIDADE E CONJUNTA	%	DISPONIBILIDADE CONJUNTA PONDERADA
0,94	0,95	0,96	0,857280	1	0,857280
0,94	0,95	0,04	0,035720	0,5	0,017860
0,94	0,05	0,96	0,045120	0,7	0,031584
0,06	0,95	0,96	0,054720	0,8	0,043776
0,94	0,05	0,04	0,001880	0,2	0,000376
0,06	0,95	0,04	0,002280	0,3	0,000684
0,06	0,05	0,96	0,002880	0,5	0,001440
0,06	0,05	0,04	0,000120	0	0,000000

A_{e2} =Somatória da última coluna da matriz acima=0,9530

Além da disponibilidade final dos gases quentes obtida os três grupos geradores em operação, dois, um ou acima, ainda é possível obter as probabilidades de se ter nenhum, conforme tabela 5:

TABELA 5
DISPONIBILIDADE DOS GRUPOS GERADORES

MATRIZ 8×3			DISPONIBILIDADE CONJUNTA	%	DISPONIBILIDADE CONJUNTA PONDERADA
0,94	0,95	0,96	0,857280	1	0,857280
3 G.G. EM OPERAÇÃO			0,857280		0,857280
0,94	0,95	0,04	0,035720	0,5	0,017860
0,94	0,05	0,96	0,045120	0,7	0,031584
0,06	0,95	0,96	0,054720	0,8	0,043776
2 G.G. EM OPERAÇÃO			0,135560		0,093220
0,94	0,05	0,04	0,001880	0,2	0,000376
0,06	0,95	0,04	0,002280	0,3	0,000684
0,06	0,05	0,96	0,002880	0,5	0,001440
1 G.G. EM OPERAÇÃO			0,007040		0,002500
0,06	0,05	0,04	0,000120	0	0,000000
0G.G. EM OPERAÇÃO			0,000120		0,000000
TOTAL			1,000000		0,953000

Essa segmentação permite o cálculo de probabilidades acumuladas, tal como na distribuição binomial, que serão úteis mais adiante.

1.3. Subsistema de geração

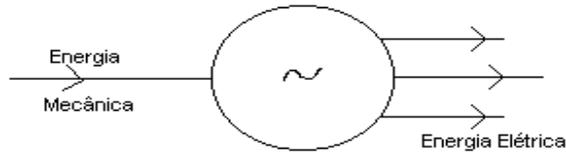
O subsistema de geração do modelo que está sendo descrito suporta até doze geradores de energia elétrica e respectivas máquinas propulsoras, formando doze grupos geradores. Do total de doze máquinas propulsoras, pode-

-se ter até seis turbinas a vapor e até seis máquinas entre motores e turbinas a gás.

Seja "m" o número de motores, "t_v" o número de turbinas a vapor e "t_g" o número de turbinas a gás, então, deve-se ter: $m \leq 6$, $t_v + t_g \leq 6$, $m + t_v + t_g \leq 12$, onde m, t_v e t_g variam de 0 a 6.

Além dos geradores e máquinas propulsoras, o subsistema de geração conta, ainda, com auxiliares, como equipamentos de lubrificação e resfriamento.

FIGURA 5



Cada gerador produzirá uma certa quantidade de energia elétrica e, mesmo sem considerar as indisponibilidades, podem ocorrer variações na geração decorrentes, por exemplo, de se desligar a máquina em determinados

horários quando é mais econômico adquirir energia da rede elétrica externa. Dessa forma, há que se trabalhar no modelo com o MW médio proporcionado por cada gerador, já descontados os consumos com auxiliares.

TABELA 6
CÁLCULO DO MW_{MÉDIO} PARA CADA GERADOR SEM CONSIDERAR INDISPONIBILIDADES

HORAS/ ANO	GERAÇÃO DE E. ELÉTRICA - MW			MWh
	BRUTA	AUXILIARES ⁽¹⁾	LÍQUIDA ⁽²⁾	
h_1	b_1	a_1	$e_1 = b_1 - a_1$	$h_1 e_1$
h_2	b_2	a_2	$e_2 = b_2 - a_2$	$h_2 e_2$
h_3	b_3	a_3	$e_3 = b_3 - a_3$	$h_3 e_3$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
h_n	b_n	a_n	$e_n = b_n - a_n$	$h_n e_n$
8760			$\bar{e} = f/8760$	$f = \sum h_i e_i$

Nota: \bar{e} ...MW_{MÉDIO} (1)Consumo com equiptos auxiliares, como bombas e ventiladores, entre outros; (2) Geração líquida é igual a geração bruta menos o consumo com auxiliares.

Os motores de Ciclo Otto ou Diesel são alimentados com combustível proveniente do subsistema de alimentação: diesel e gás natural, entre outros. Fornecem a força motriz para os geradores e energia térmica que pode ser utilizada

em uma caldeira de recuperação para a geração do vapor a ser utilizado em uma turbina a vapor ou, diretamente, em aplicações residenciais, comerciais ou industriais.

TABELA 7
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
SISTEMA COM SEIS GRUPOS MOTO-GERADORES

GRUPOS	DISPONIBILIDADES				MW MÉDIO	MWh
	COMBUST.	MOTOR	GERADOR	DEMANDA		
1	A_{11}	A_{21}	A_{31}	A_{41}	\bar{e}_1	$e'_1 = \bar{e}_1 \prod A_{i1}$
2	A_{12}	A_{22}	A_{32}	A_{42}	\bar{e}_2	$e'_2 = \bar{e}_2 \prod A_{i2}$
3	A_{13}	A_{23}	A_{33}	A_{43}	\bar{e}_3	$e'_3 = \bar{e}_3 \prod A_{i3}$
4	A_{14}	A_{24}	A_{34}	A_{44}	\bar{e}_4	$e'_4 = \bar{e}_4 \prod A_{i4}$
5	A_{15}	A_{25}	A_{35}	A_{45}	\bar{e}_5	$e'_5 = \bar{e}_5 \prod A_{i5}$
6	A_{16}	A_{26}	A_{36}	A_{46}	\bar{e}_6	$e'_6 = \bar{e}_6 \prod A_{i6}$
TOTAL					$\sum_{j=1}^6 \bar{e}_j$	$e' = \sum_{k=1}^6 e'_k$

Nota: A disponibilidade da demanda deve considerar todos os equipamentos que estão no subsistema de demanda, como transformadores, chillers de absorção e cargas diversas. A disponibilidade do sistema de geração será:

$$A_g = \frac{e'}{\sum_{j=1}^6 \bar{e}_j}$$

Pela formulação acima, calcula-se a disponibilidade final do sistema, porém não se tem as probabilidades de se

dispor de pelo menos 5 ou 4 motores. Para tanto, é necessário construir a matriz 64×6 .

A título de exemplificação, seja um sistema com três grupos moto-geradores, com gerações líquidas iguais a 20MW, 30MW e 50MW, respectivamente, gerando a matriz 8×3 (tabela 8):

TABELA 8
GERAÇÃO ASSEGURADA

MATRIZ 8x3			DISPONIBIL/ CONJUNTA	CONFIABIL/ ACEITÁVEL	GERAÇÃO ASSEGURADA MW	GERAÇÃO MÉDIA
0,94	0,95	0,96	0,857280	85,72800	100	85,7280
3 G.G. EM OPERAÇÃO			0,857280	85,72800	100	85,7280
0,06	0,95	0,96	0,054720	91,20000	80	4,37760
0,94	0,05	0,96	0,045120	95,71200	70	3,15840
0,94	0,95	0,04	0,035720	99,28400	50	1,78600
2 G.G. EM OPERAÇÃO			0,135560	99,28400	50	9,3220
0,06	0,05	0,96	0,002880	99,57200	50	0,14400
0,06	0,95	0,04	0,002280	99,80000	30	0,06840
0,94	0,05	0,04	0,001880	99,99988	20	0,03760
1 G.G. EM OPERAÇÃO			0,007040	99,99988	20	0,2500
0,06	0,05	0,04	0,000120	0	0	0
OG.G. EM OPERAÇÃO			0,000120	100,00000	0	0
TOTAL			1,000000			95,3000

Disponibilidade = $95,30/100 = 0,953$

Na tabela acima é possível verificar que, se ao invés de 100% for aceitável uma confiabilidade de 99,99988%, então apenas com a geração local já se dispõe de uma geração assegurada de 20 MW, gerando economia na contratação do backup.

As turbinas a vapor são alimentadas com vapor proveniente das caldeiras convencionais ou de recuperação que se encontram no subsistema de alimentação, fornecem a força motriz para os geradores de energia elétrica, podem fornecer vapor em vários níveis de pressão para utilização residencial, industrial e comercial ou vapor em baixa pressão para condensação e bombeamento para as caldeiras.

Um sistema simples com até seis grupos geradores com máquinas a vapor alimentadas a partir de caldeiras teria uma formulação similar à anterior, apenas a disponibilidade do combustível seria o resultado da

disponibilidade do vapor proveniente das caldeiras, conforme formulado no item 1.2, subsistema de alimentação, observando que o vapor pode vir de uma, duas ou até de seis caldeiras distintas, em partes iguais ou diferentes.

As turbinas a gás são alimentadas pelo gás natural proveniente da rede de gasodutos ou gerados a partir de combustíveis fósseis. Fornecem a força motriz para os geradores e gases quentes de exaustão para as caldeiras de recuperação ou para utilização industrial direta em processos como aquecimento e secagem.

Para ilustrar o desenvolvimento do modelo até este ponto, segue um exemplo de um sistema com um grupo turbo-gerador a gás e dois grupos turbo-geradores a vapor, acrescidos, ainda, de uma caldeira de recuperação e duas caldeiras convencionais, conforme figura 6:

Figura 06
Sistema de Geração

CC Caldeira Convencional
 CR Caldeira de Recuperação
 ◊ Combustível

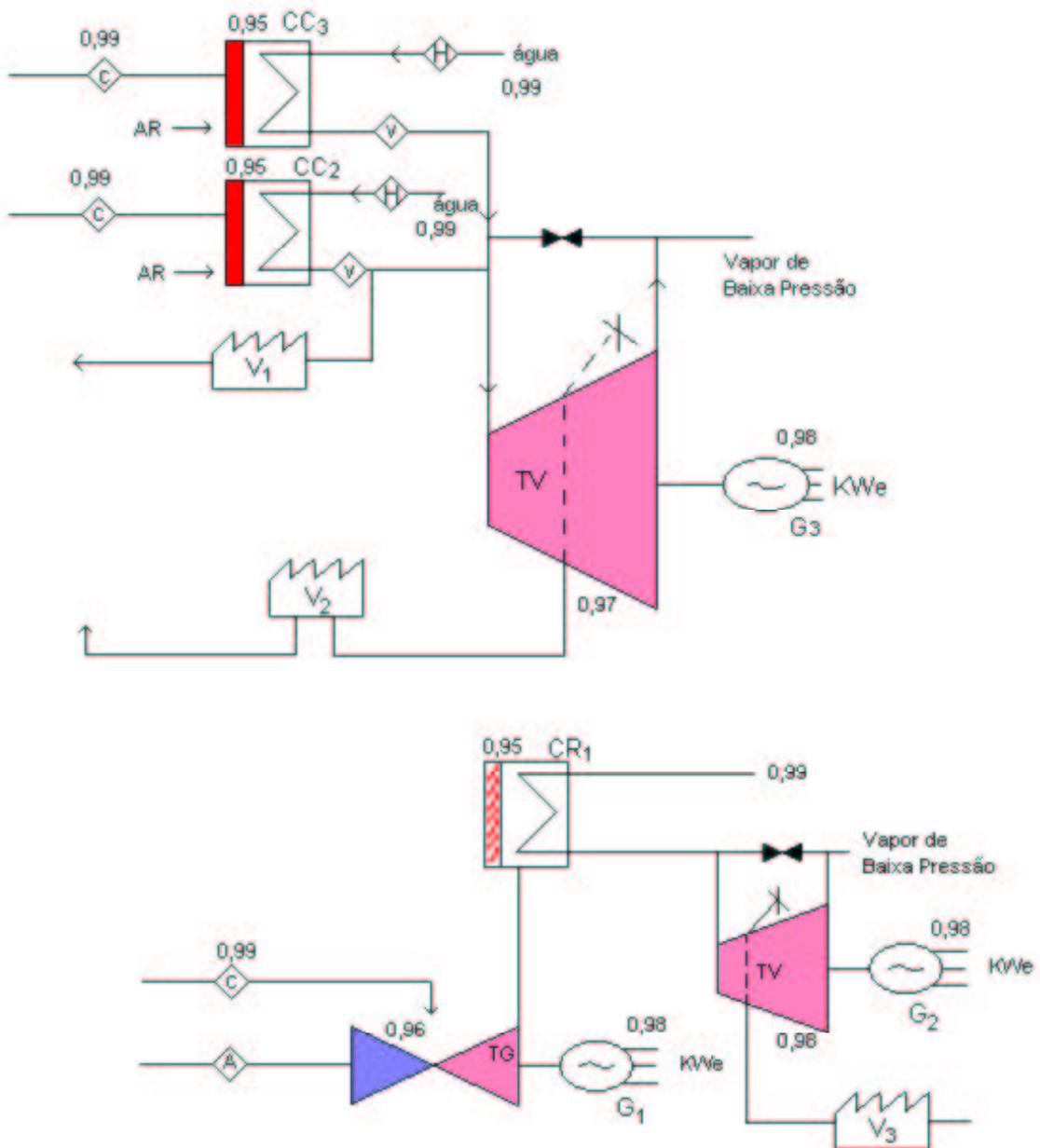


TABELA 09
CÁLCULO DO MW_{MÉDIO} PARA CADA GERADOR
SEM CONSIDERAR INDISPONIBILIDADES

GERADOR	HORAS	MW LÍQUIDO	MWh	MW MÉDIO
G ₁	8.760	10	87.600	10
G ₂	1.000	12	12.000	17,260
	2.000	17	34.000	
	2.000	15	30.000	
	<u>3.760</u>	20	<u>75.200</u>	
	8.760		151.200	
G ₃	1.000	0	0	12,146
	2.000	10	20.000	
	<u>5.760</u>	15	<u>86.400</u>	
	8.760		106.400	
				Σ = 39,406

TABELA 10
DISPONIBILIDADE DO VAPOR

CALDEIRAS	DISPONIBILIDADES			
	ÁGUA/ CONDENS.	GASES/ COMBUST.	EQUIPTO	VAPOR
1	0,99	0,9504	0,95	0,89385
2	0,99	0,99	0,95	0,9311
3	0,99	0,99	0,95	0,9311

TABELA 11
DISPONIBILIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

GRUPOS	DISPONIBILIDADES				MW MÉDIO	MWh/h
	COMBUST.	TURBINA	GERADOR	DEMANDA		
1	0,99	0,96	0,98	1	10,000	9,314
2	0,89385	0,98	0,98	1	17,260	14,817
3	0,9311	0,97	0,98	1	12,146	10,750
TOTAL					39,406	34,881

Disponibilidade da geração de energia elétrica igual a: $A_g = \frac{34,881}{39,406} = 0,885$

TABELA 12
GERAÇÃO ASSEGURADA

MATRIZ 8×3			DISPONIBIL/ CONJUNTA	CONFIABIL/ ACEITÁVEL %	GERAÇÃO ASSEGURADA MW	GERAÇÃO MÉDIA
0,9314	0,8585	0,8851	0,707732	70,7732	39,406	27,888
3 G.G. EM OPERAÇÃO			0,707732	70,7732	39,406	27,888
0,0686	0,8585	0,8851	0,052126	75,9858	29,406	1,533
0,9314	0,8585	0,1149	0,091875	85,1733	27,260	2,505
0,9314	0,1415	0,8851	0,116650	96,8383	22,146	2,583
2 G.G. EM OPERAÇÃO			0,260651	96,8383	22,146	6,621
0,0686	0,8585	0,1149	0,006767	97,5150	17,260	0,117
0,0686	0,1415	0,8851	0,008592	98,3742	12,146	0,104
0,9314	0,1415	0,1149	0,015143	99,8885	10,000	0,151
1 G.G. EM OPERAÇÃO			0,030502	99,8885	10,000	0,372
0,0686	0,1415	0,1149	0,001115	100,0000	0	0
OG.G. EM OPERAÇÃO			0,001115	100,00000	0	0
TOTAL			1,000000			34,881

Se for aceitável uma confiabilidade de 99,89%, então, tem-se uma geração assegurada de 10 MW.

O cálculo das disponibilidades dos gases quentes e do vapor é similar ao da e. elétrica.

Para um sistema com “n” grupos geradores a dimensão da matriz acima será de $2^n \times n$. No aplicativo desenvolvido $2 \leq n \leq 12$, gerando as matrizes a da tabela 13:

TABELA 13
DIMENSÕES DAS MATRIZES

n	DIMENSÃO	
2	$2^2 \times 2$	4×2
3	$2^3 \times 3$	8×3
4	$2^4 \times 4$	16×4
5	$2^5 \times 5$	32×5
6	$2^6 \times 6$	64×6
7	$2^7 \times 7$	128×7
8	$2^8 \times 8$	256×8
9	$2^9 \times 9$	512×9
10	$2^{10} \times 10$	1024×10
11	$2^{11} \times 11$	2048×11
12	$2^{12} \times 12$	4096×12

1.4. Subsistema de demanda

No subsistema de demanda encontra-se toda a conexão da geração de energia elétrica com o sistema elétrico interno e externo, quando houver. Em outras palavras, todo o sistema de conexão e carga elétrica pós-gerador, transformadores de tensão, disjuntores, bomba do chiller de absorção, cargas diversas e rede elétrica externa, quando houver a conexão para recebimento de energia de backup e exportação de excedentes.

É importante delimitar até onde vai a responsabilidade do produtor independente de energia elétrica. Por exemplo, se os transformadores de tensão, quando houver, pertencerem ao sistema de geração, então a sua indisponibilidade deve ser considerada para o cálculo da indisponibilidade geral do sistema de geração. O mesmo deve ser observado para qualquer outra indisponibilidade do lado da demanda, que cause perda de geração não coberta pela demanda contratada. No aplicativo, o default para a disponibilidade do subsistema de demanda é igual a um, porém pode ser alterada, conforme a conveniência.

Suponha-se, por exemplo, uma geração distribuída, conectada à rede elétrica de uma concessionária e exportando a totalidade da energia produzida para a área de uma outra concessionária. A indisponibilidade da rede da concessionária local gerará a perda de geração local de energia elétrica. Se não houver indenizações por essa perda, então, ela deverá ser considerada no cálculo da energia efetivamente gerada, pois de outro lado será necessário um backup para suprir tal ausência de geração.

Ainda no subsistema de demanda, encontram-se os processos que consomem gases quentes ou vapor.

Tanto para os gases quentes como para o vapor, o aplicativo prevê um máximo de quatro processos independentes para cada um. Assim, pode-se ter um processo com a utilização de vapor, em determinado nível de pressão, proveniente de uma caldeira e outros processos com vapor em outros níveis de pressão, provenientes de outras caldeiras ou extraído das turbinas a vapor. Para o cálculo da disponibilidade do vapor de cada processo, o aplicativo solicita na entrada dos dados que seja informado os percentuais de vapor provenientes de cada fonte, haja vista que cada fonte poderá apresentar disponibilidade diferente das demais.

2. CÁLCULO DA ENERGIA DE BACKUP, EXCEDENTES E SUPLEMENTAR

Calculada a disponibilidade da geração e de posse da demanda local para intervalos de 15 minutos, obtém-se a necessidade de energia suplementar e de backup e a existência de excedentes para exportação, também, para intervalos de 15 minutos.

O backup é necessário tanto para as paradas forçadas como para as paradas programadas. A separação do backup para essas duas finalidades permite uma estimativa mais precisa para as despesas, pois as paradas programadas podem ser feitas nos períodos em que o custo da energia de backup seja mais baixo.

De outro lado, o mercado atribui preços diferentes para a energia, de acordo com o dia e horário em que ela é consumida, seja para o backup, para os excedentes ou para a energia suplementar. Assim, ao dispor das demandas para intervalos de 15 minutos, pode-se calcular, por exemplo, as despesas com energia de backup e suplementar e a receita com excedentes, considerando-se os patamares de carga leve, média e pesada para os dias do tipo 1 e 2, conforme estabelecido pelo mercado atacadista de energia no Brasil:

Dias tipo 1: dias úteis e sábados

Patamares de Carga: De “zero” |—— 7:00 Carga Leve

De 21:00 |—— 24:00 Carga pesada

Restante: Carga média

Dias tipo 2: domingos e feriados.

Patamares de Carga: De 17:00 |—— 22:00 Carga média

Restante: Carga leve

Para a contratação de energia suplementar e de backup e para a venda de excedentes, os preços deverão ser mais baixos para o período de carga leve e mais altos para o período de carga pesada, permitindo, assim, melhores estimativas para despesas e receitas com energia.

3. DESCRIÇÃO DO APLICATIVO

O aplicativo calcula de forma rápida e precisa as disponibilidades de energia elétrica e vapor, receitas com a venda da energia, inclusive excedentes de energia elétrica, e despesas com energia de backup e suplementar. Esses resultados são, então, diretamente utilizados no cálculo do tempo e da taxa interna de retorno do projeto e respectivo fluxo de caixa, permitindo, assim, rápidas simulações para o uso de um número maior de máquinas ou para diferentes níveis de confiabilidade.

Esta primeira parte da descrição onde não é apresentada, ainda, a parte econômica financeira, foi elaborada em 8 planos do Excel, conforme segue:

Primeiro plano: Entrada, processamentos iniciais e resultados parciais, intermediários e finais.

Segundo plano: São gerados os pares de matrizes de mesma ordem para o cálculo da disponibilidade e confiabilidade da energia elétrica, que podem ser de ordem 4×2 até os pares maiores de ordem 4096×12 . A primeira matriz do par recebe as gerações líquidas dos grupos geradores e a segunda recebe as disponibilidades resultantes dos grupos geradores obtidas no primeiro plano.

Ainda, neste plano, são feitos os cálculos da energia elétrica de backup, excedente e suplementar.

Terceiro Plano: Cada caldeira de recuperação pode receber gases quentes de todos os motores e turbinas a gás, de um a seis. Como, também, podemos ter até seis caldeiras de recuperação, então neste plano são geradas as matrizes para o cálculo das disponibilidades dos gases quentes para cada caldeira.

Para cada caldeira são gerados os pares de matrizes de mesma ordem para o cálculo da disponibilidade e confiabilidade da energia elétrica, que podem ser de ordem 4×2 até os pares maiores de ordem 64×6 . A primeira matriz do par recebe as porcentagens de gases provenientes dos motores ou turbinas a gás que a alimentam e a segunda recebe as disponibilidades resultantes dos grupos geradores que a alimentam.

De forma idêntica, são geradas as matrizes para o cálculo da disponibilidade e confiabilidade de gases quentes para até quatro processos independentes.

Quarto Plano: Geração dos matrizes de ordem até 64×6 para o cálculo das disponibilidades de vapor para as turbinas a vapor.

Quinto ao Oitavo Plano: Cada processo independente de demanda de vapor pode ser alimentado por uma das até seis caldeiras ou seis turbinas a vapor.

Em cada um dos planos, do quinto ao oitavo, são gerados os pares de matrizes de ordem até 4096×12 para o cálculo das disponibilidades e confiabilidades de vapor para um processo independente de demanda de vapor.

Como resultado do aplicativo até este ponto, têm-se os valores anuais a serem gastos com a energia de backup, suplementar e excedente e com o uso da rede da concessionária, pela reserva de capacidade para transporte da energia de backup e exportação de excedentes. Além do faturamento da energia, vapor, água-quente e gases quentes.

Em resumo, têm-se as despesas e receitas, decorrentes da geração, que permitem alimentar a parte final do aplicativo, ou seja, a análise da viabilidade econômica e financeira.

4. VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA

Além dos resultados citados no item 3 acima, que são automaticamente transferidos para a análise econômica e financeira, na parte final do aplicativo, acrescenta-se os dados de investimentos, financiamento, impostos, depreciação, despesas com operação e manutenção e outros encargos, para obtenção do fluxo de caixa do projeto, com payback, valor presente líquido e taxa interna de retorno com e sem financiamento.

5. CONCLUSÃO

A aplicação do modelo para o caso particular da figura 6 confirma o cálculo da disponibilidade realizado sem o uso do aplicativo e destaca a melhoria na análise econômica e financeira propiciada pelo refinamento dos cálculos (tabela 14).

TABELA 14
RESULTADOS COM E SEM O USO DO APLICATIVO

DISCRIMINAÇÃO		SEM O USO DO APLICATIVO (A)	COM O USO DO APLICATIVO (B)
GERAIS	Disponibilidade Percentual (1)	0,885	0,885
	Energia de Backup (2)	39.639,00 MWh	28.076,34 MWh
	Energia excedente (3)	62.360 MWh	50.797,49 MWh
RECEITAS	Energia Elétrica para o Processo (4)	22.627.333,33	22.627.333,33
	Energia Elétrica Excedente (5)	2.806.200,00	2.031.899,48
	Vapor (6)	6.569.343,00	6.569.343,00
DESPESAS	Energia Elétrica de Backup (7)	(7.135.020,00)	(4.491.507,00)
	Uso da Rede (8)	(4.364.117,26)	(4.364.117,26)
RESULTADOS (9)		SEM USO DE APLICATIVO "A"	COM USO DE APLICATIVO "B"
COM FINANCIAMENTO (10)			
	Payback em Anos	16	10
	Valor Presente Líquido em reais	(5,0) milhões	10,8 milhões
	Taxa Interna de Retorno	15%	25,3 %
SEM FINANCIAMENTO			
	Payback em Anos	21,0	12,6
	Valor Presente Líquido em reais	(1,6) milhões	8,6 milhões
	Taxa Interna de Retorno	14,3%	18,5%

(1) Como se trata de uma planta simples, o cálculo em "B" apenas confirma o cálculo em "A";

(2) Em "A" utiliza-se valores médios horários. Em "B" utiliza-se as demandas integralizadas de 15 minutos, daí a diferença;

(3) Com a estimativa da energia de backup acima das necessidades, aumentam os excedentes em "A";

(4) R\$ 80,00/MWh, em "A" e "B", sem patamares de carga;

(5) Em "A": R\$ 45,00/MWh, sem patamares; Em "B": R\$ 40,00/MWh; R\$ 45,00/MWh; R\$ 50,00/MWh; nos patamares de carga leve, média e pesada;

(6) R\$ 25,00 por tonelada/hora em "A" "B";

(7) Em “A”: R\$ 180,00/MWh, sem patamares; Em “B”, nos patamares de carga leve, média e pesada: R\$ 80,00; R\$ 90,00 e R\$ 100,00 por MWh, nas paradas programadas e R\$ 160,00; R\$ 180,00 e R\$ 200,00 por MWh nas paradas forçadas;

(8) Não há diferença entre “A” e “B”;

(9) Investimento: 40 milhões; Duração do Projeto: 15 anos; Início: 2003; Taxa de Desconto: 15% ao ano; Depreciação: 10% ao ano

(10) Juros: 1,17% a.m.; Amortização: 120 meses

Observamos, ainda, que as diferenças entre os resultados de “A” e “B” poderiam ser maiores, caso se tratasse de uma planta complexa em que, para o cálculo da disponibilidade em “A”, fossem necessárias aproximações sucessivas, com prejuízo da precisão final, e muita concentração na operação dos cálculos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BILLINGTON, Allan R. N. Reliability evaluation of power system. Pitman Publishing, UK, 1984.
- [2] BOISSENIN, Yves. La cogeneration et les economies d’énergie. In: REVUE TECHNIQUE GEC ALSTHOM, Belfort, France, 1999. Nº 10, p. 3-18.
- [3] ISREB, M. Reliability engineering appraisal for power plants life assessment and management. In: AMERICAN POWER CONFERENCE, 1998. Proceedings of 60th Annual Meeting. Chicago: 1998. p. 683-689.
- [4] JINYUAN, S. et al. A reliability and availability growth model for power equipment and its verification with field data. In: JOINT POWER GENERATION CONFERENCE, 1999. PWR-Vol. 34, New York: ASME, 1999. p. 9-12.
- [5] JONES, S. R. Reliability and market facilitation. In: AMERICAN POWER CONFERENCE, 1997. Proceedings of 59th Annual Meeting. Chicago: 1997. p. 671-676.
- [6] LEE, R.A.; JONES, R.E. Plant reliability optimization. In: JOINT POWER GENERATION CONFERENCE, 1999. PWR-Vol. 34, New York: ASME, 1999. p. 673-680.
- [7] MITRA, J.; SINGH, C. Reliability analysis of emergency and standby power systems. IEEE Industry Application Magazine, Texas: sept./oct.1997. p. 41-47.
- [8] OCHOA, J.R.; GARRISON, D.L. Application of reliability criteria in power systems planning. In: AMERICAN POWER CONFERENCE, 1994. Proceedings of 56th Annual Meeting. Chicago: 1994. p. 1114-1120.
- [9] PARASCOS, E.T. Reliability, availability and maintainability in the electric power industry. In: AMERICAN POWER CONFERENCE, 1992. Proceedings of 54th Annual Meeting. Chicago: 1992. p. 589-593.
- [10] REZINSKIKH, V.F. et al. Reliability and durability enhancement for fossil power units’ main equipment metal. In: AMERICAN POWER CONFERENCE, 1999. Proceedings of 61th Annual Meeting. Chicago: 1999. p. 801-805.
- [11] VELVIKIS, M. et al. Reliability standards for electrical testing of distributed generation systems. In: AMERICAN POWER CONFERENCE, 1999. Proceedings of 61th Annual Meeting. Chicago: 1999. p. 778-782.