

# BIOMASSA E ENERGIA SOLAR TÉRMICA NA SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE POLIGERAÇÃO

**Monica Carvalho** – monica@cear.ufpb.br

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia de Energias Renováveis.

**Alberto Romero** – aromero@mirarco.org

Energy Renewables & Carbon Management Group, Mining Innovation Rehabilitation and Applied Research Corporation (MIRARCO). / BESTECH Research & Development.

**Dean Millar** – dmillar@mirarco.org

Energy Renewables & Carbon Management Group, Mining Innovation Rehabilitation and Applied Research Corporation (MIRARCO). Bharti School of Engineering, Laurentian University.

**Resumo.** O projeto ótimo de um sistema de poligeração pode ser obtido a partir de informações sobre as demandas energéticas do centro consumidor, baseando-se nas características técnicas dos equipamentos e nos recursos energéticos disponíveis. O projeto ótimo compreende tanto a configuração ótima do sistema a ser instalado quanto o modo ótimo de operação ao longo do ano, considerando os fluxos de energia a preços de mercado e utilizando a capacidade produtiva dos equipamentos instalados. O modelo de otimização compara os balanços econômicos anuais para todas as configurações viáveis do sistema através de uma superestrutura de poligeração. Aqui se considerou um hospital localizado em João Pessoa, Paraíba, Brasil. Os serviços energéticos considerados foram eletricidade, calor (água quente: uso direto e lavanderia), vapor (esterilização), e refrigeração (ar-condicionado). Equipamentos comerciais foram considerados, desde os mais convencionais (grupo gerador a diesel) até os menos usuais (máquina de refrigeração por absorção), e recursos energéticos renováveis foram incluídos na forma de biomassa e energia solar. Minimiza-se uma função objetivo, sempre atendendo às demandas de energia do centro consumidor. O projeto ótimo é obtido como resultado da solução de um modelo de programação linear inteira, no qual a função objetivo foi o custo anual (R\$/ano). Para o cenário atual definido em João Pessoa, a solução ótima incluiu a utilização de biomassa como recurso energético, além da instalação de 284 coletores solares para a produção de água quente, resultando numa economia anual de R\$ 146.867 em comparação a um sistema tradicional. Observou-se que uma estratégia de investimentos que permita amortizações lentas incentivará o uso de coletores solares e biomassa, com grandes investimentos em equipamentos, mas com benefícios maiores em longo prazo.

**Palavras-chave:** poligeração, biomassa, energia solar, otimização, programação linear.

## 1. INTRODUÇÃO

A situação apresentada por Garcia et al. (2006), na qual a significância dos edifícios como importantes centros consumidores de energia não está amplamente difundida na Espanha, pode ser estendida ao Brasil. Em todos os edifícios devem ser mantidas condições de conforto, sempre atendendo às suas demandas de eletricidade, água quente, aquecimento e refrigeração. Em geral, os hospitais apresentam um consumo energético elevado e funcionam sem interrupções ao longo do ano, sendo assim ótimos candidatos à instalação de sistemas de poligeração também devido à necessidade simultânea de energia elétrica e térmica. Poligeração se define aqui como a produção simultânea de dois ou mais serviços energéticos que são produzidos localmente através de sistemas energéticos integrados. Como resultado, a energia produzida é mais bem aproveitada do que se fosse produzida de maneira separada. Tanto a poligeração quanto a integração energética são ferramentas promissoras para alcançar uma melhor eficiência no uso dos recursos naturais, e na maioria dos casos, também uma redução nos impactos ambientais gerados (Serra et al., 2009). As principais vantagens dos sistemas de poligeração são a economia de energia primária, redução de emissões contaminantes e serviços energéticos mais baratos (Ziher, Poredos, 2006). O fornecimento de energia se torna mais confiável, já que um sistema conectado a rede elétrica garante a operação contínua, além de mais estável, pois estes sistemas proporcionam um alívio significativo à rede elétrica durante os meses de verão (França, Caseiro, 2007).

Vários estudos tem sido desenvolvidos na área da otimização de sistemas de poligeração em edifícios, como por exemplo, em hotéis (Rubio-Maya, Uche, Martinez, 2011), edifícios residenciais (Basrawia, Yamadab, Obarac, 2013), indústrias (Freschi et al., 2013), edifícios comerciais (Marimón et al., 2011) e hospitais (Ziher, Poredos, 2006; Arcuri, Florio, Fragiaco, 2007; Lozano et al., 2009; Romero, Carvalho, Millar, 2014). Porém a configuração ótima de sistemas de poligeração é um problema complexo, que requer estudos detalhados, devido à grande variedade de opções tecnológicas para o fornecimento e conversão de energia, grandes variações diárias e anuais dos consumos, e também variações dos preços e tarifas de energia. Segundo Shang e Kokossis (2005), esta variabilidade presente nas demandas energéticas necessita de uma metodologia de projeto que resulte em sistemas que produzam eficientemente (objetivo termodinâmico), sejam capazes de se adaptar a diferentes condições de demanda e mercado (flexibilidade operacional), além de operar com custo econômico mínimo.

O projeto de sistemas de poligeração aqui proposto considera a configuração do sistema (tipo de tecnologia empregada e número de equipamentos instalados) e a estratégia operacional (modo de operação dos equipamentos ao longo do ano, incluindo fluxos de compra de recursos energéticos). Segundo Lozano e Ramos (2000), os fatores mais influentes são a disponibilidade de combustíveis, o preço da eletricidade, os preços dos outros combustíveis utilizados e sua relação com o preço da eletricidade, além das condições legais para vender eletricidade autoproduzida à rede elétrica.

Este trabalho adapta e estende as metodologias estabelecidas em Carvalho (2011) e Romero, Carvalho e Millar (2014), baseadas em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) - que vem sendo amplamente usada na otimização de sistemas de fornecimento de energia (Yokoyama, Hasegama, Ito, 2002; Ren, Gao, 2012). Este trabalho vai um passo além ao considerar biomassa e energia solar (térmica, para produção de água quente) como recursos energéticos disponíveis. O modelo de otimização compara todos os balanços econômicos para todas as configurações viáveis contidas na super-estrutura de poligeração, e fornece a configuração ótima e o modo ótimo de operação.

## 2. SISTEMA DE POLIGERAÇÃO

### 2.1 Aspectos gerais

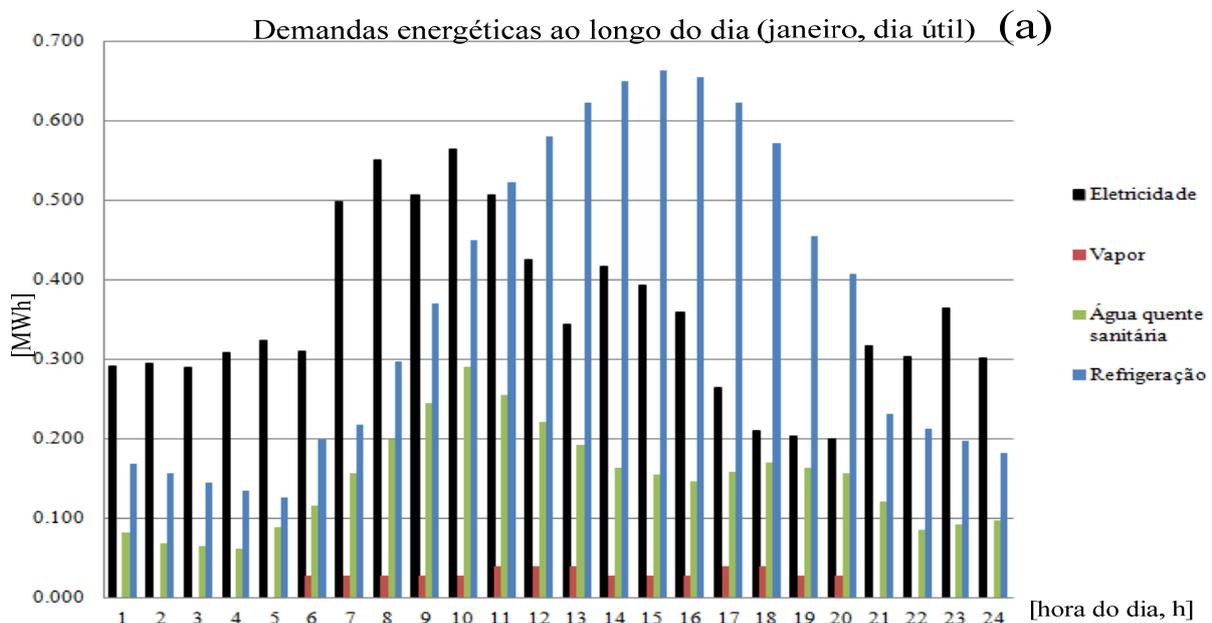
O objetivo de um sistema de fornecimento de energia é atender às demandas energéticas (eletricidade, água quente, aquecimento e refrigeração, *etc.*) de um dado centro consumidor. Sem entrar em considerações ambientais, a decisão de instalar ou não um sistema de poligeração recai somente na análise econômica. O investimento em qualquer equipamento novo é motivado pelo seu retorno econômico, assim que os investimentos em poligeração sempre competem com outros projetos que possam provar ser mais econômicos.

Para o desenvolvimento desta análise, considerou um hospital de 420 leitos, localizado em João Pessoa, Paraíba, Brasil. As demandas energéticas consideradas foram eletricidade, água quente, vapor e refrigeração. O estudo estende-se ao longo de um período de um ano, distribuído em dois dias representativos (dia útil e fim-de-semana) por mês. Cada dia se divide em 24 períodos horários, resultando em 576 períodos de operação diferentes ao longo do ano.

Dados reais para eletricidade foram utilizados, e utilizou-se o método dos graus-dia (Erbs, Klein e Beckman, 1983) juntamente com dados climáticos (CLIMATICUS 4.2, 2005), dados de ocupação (Nepote, Monteiro e Hardy, 2009) e dados obtidos da auditoria energética (Araújo, 2004) para calcular as demandas energéticas representativas de água quente, vapor e refrigeração. A Fig. 1 mostra as demandas energéticas para um dia útil e um dia de fim-de-semana, para um mês de verão (janeiro).

O hospital possui área total de 49.000m<sup>2</sup>, e as seguintes demandas energéticas anuais: 2791 MWh de eletricidade, 1947 MWh de água quente (uso direto e lavanderia), 138 MWh de vapor (esterilização), e 2309 MWh de refrigeração.

A demanda de vapor foi considerada constante durante o período de utilização da central de esterilização, entre 6h e 20h, acrescida da demanda de um balcão térmico no restaurante, no horário de almoço e jantar. A demanda de água quente possui dois contribuintes: a lavanderia, que opera entre 8h e 18h, e o uso interno hospital, que opera sem interrupções durante as 24 horas do dia. A Tab. 1 mostra um resumo da energia para os dias representativos utilizados no estudo.



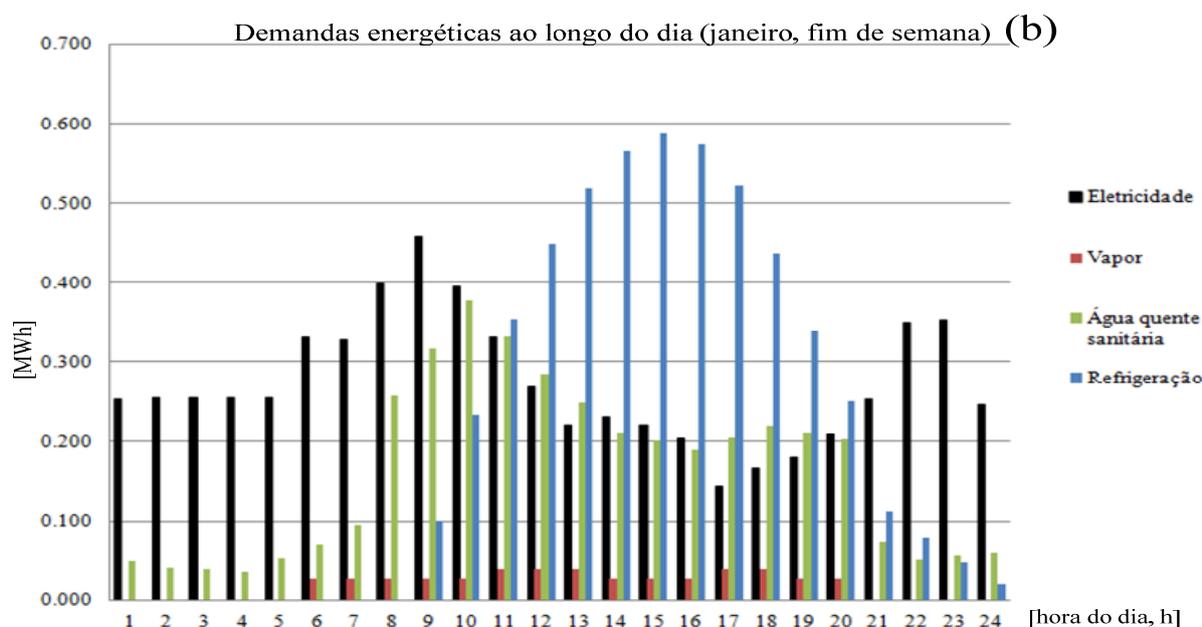


Figura 1 - Demandas energéticas para um dia útil (a) e fim de semana (b): mês de verão (janeiro).

Tabela 1 - Demandas do hospital: eletricidade, água quente, vapor e refrigeração.

Mês Dia Representativo	n <sub>d</sub> (dias/ano)	Eletricidade	Água Quente	Vapor	Refrigeração
		Total MWh/dia	Total MWh/dia	Total MWh/dia	Total MWh/dia
Jan útil	20	8,538	3,543	0,465	5,961
Jan fds*	11	6,315	3,543	0,233	4,360
Fev útil	19	9,696	6,436	0,465	6,472
Fev fds	9	6,247	6,436	0,233	4,290
Mar util	20	9,861	6,436	0,465	8,013
Mar fds	11	7,474	6,436	0,233	5,443
Abr útil	20	9,949	6,436	0,465	7,071
Abr fds	10	7,348	6,436	0,233	4,737
Mai útil	20	8,901	6,436	0,465	7,895
Mai fds	11	6,383	6,436	0,233	5,534
Jun útil	19	7,489	5,032	0,465	7,768
Jun fds	11	6,832	5,032	0,233	5,259
Jul útil	20	6,568	3,881	0,465	5,186
Jul fds	11	6,045	3,881	0,233	3,760
Ago útil	20	5,954	3,881	0,465	7,343
Ago fds	11	4,681	3,881	0,233	4,941
Set útil	21	6,686	3,881	0,465	7,483
Set fds	9	4,755	3,881	0,233	5,046
Out útil	20	8,041	5,284	0,465	8,834
Out fds	11	5,969	5,284	0,233	6,057
Nov útil	20	9,309	6,436	0,465	8,260
Nov fds	10	6,022	6,436	0,233	5,627
Dez útil	20	1,036	6,436	0,465	5,912
Dez fds	11	7,389	6,436	0,233	3,879
Σ		MWh/ano	MWh/ano	MWh/ano	MWh/ano
Ano	365	2791	1947	138	2309

\* fds = fim-de-semana

Para um sistema de poligeração, todas as possibilidades de tecnologias para conversão de energia e todos os serviços energéticos possíveis podem ser representados num único diagrama, a super-estrutura (Fig. 2), que inclui as conexões entre tecnologias de conversão de energia e indica os mecanismos de conversão disponíveis durante o processo de otimização. A Fig. 1 indica que para este caso particular, a super-estrutura permite a compra e venda de eletricidade (EE) à rede elétrica, permitindo também a compra de gás natural (GN) e biomassa (BM). Outras utilidades energéticas presentes na super-estrutura são: vapor (VA), água quente (AQ), água de refrigeração (AR), e água fria (AF). C representa as utilidades que podem ser compradas junto ao mercado (importação), V representa a venda

(exportação), D representa as demandas do centro consumidor, e P representa as perdas ao meio ambiente (calor evacuado).

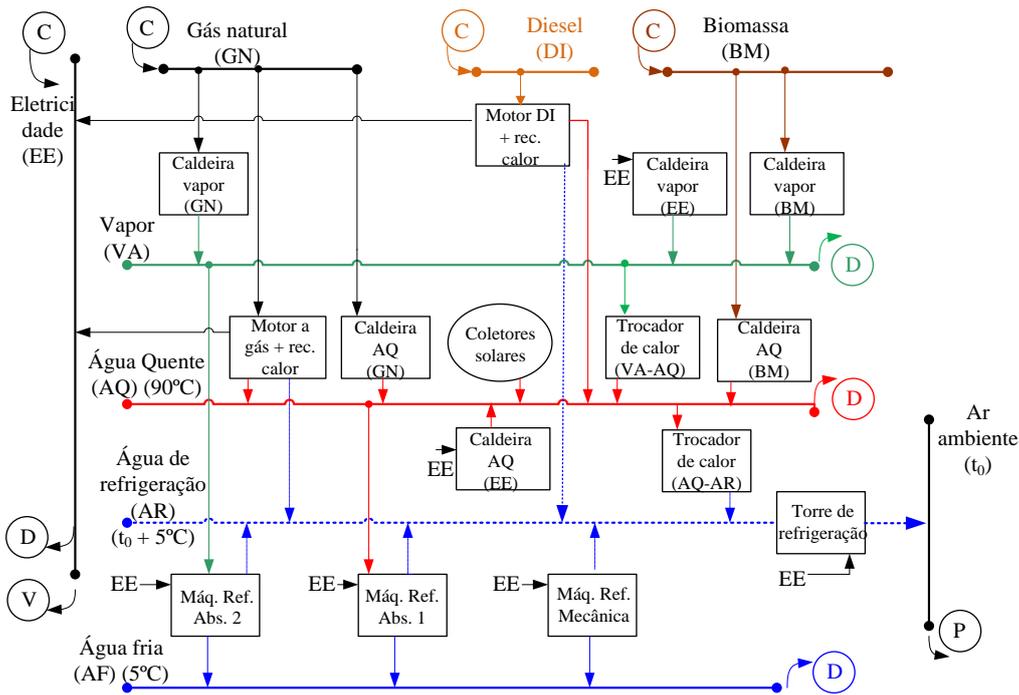


Figura 2 - Super-estrutura do sistema de poligeração.

## 2.2 Equipamentos e considerações econômicas

A Tab. 2 mostra as características técnicas e econômicas dos equipamentos selecionados para fazer parte da super-estrutura (Fig. 2). Informações técnicas foram obtidas a partir dos catálogos dos fabricantes, e seus preços foram obtidos através de consulta direta. Na parte esquerda da Tab. 2, as linhas indicam as tecnologias potencialmente instaláveis, e as colunas indicam os recursos energéticos disponíveis. O coeficiente em negrito indica o fluxo que define a capacidade produtiva do equipamento, e coeficientes positivos e negativos, indicam, respectivamente, que o fluxo é produzido ou consumido.

Tabela 2 - Matriz de coeficientes técnicos de produção e dados das tecnologias.

	Coeficientes técnicos de produção									Equipamento		
	GN	BM	DI	VA	AQ	AR	AA	AF	EE	Custo CINV (10 <sup>3</sup> R\$)	Custo O&M (R\$/MWh)	Pot. Nom. PNOM (MW)
Motor a gás	-2,63				1,10	0,45			<b>1</b>	463,00	15,00	0,41
Motor a diesel			-2,66		0,80	0,50			<b>1</b>	227,00	15,00	0,36
Cald. VA (GN)	-1,18			<b>1</b>						47,90	2,00	0,30
Cald. VA (BM)		-1,40		<b>1</b>						51,00	8,00	0,25
Cald. VA (EE)				<b>1</b>					-1,15	42,50	2,00	0,15
Trocador(VA-AQ)				-1,10	<b>1</b>					8,90	2,00	0,40
Cald. AQ (GN)	-1,22				<b>1</b>					49,30	2,00	0,30
Cald. AQ (BM)		-1,25			<b>1</b>					62,50	8,00	0,17
Cald. AQ (EE)					<b>1</b>				-1,11	28,20	2,00	0,15
Trocador(AQ-AR)					-1,10	<b>1</b>				7,40	2,00	0,40
Máq. Ref. Abs. 2				-0,77		1,77		<b>1</b>	-0,01	465,20	10,00	0,46
Máq. Ref. Abs. 1					-1,32	2,32		<b>1</b>	-0,01	539,70	10,00	0,49
Máq. Ref. Mecâni						1,21		<b>1</b>	-0,21	145,00	4,00	0,28
Torre Refriger.						-1,00	<b>1</b>		-0,02	28,20	10,00	1,00

A complexidade do problema é tal que todas as demandas energéticas variam hora-a-hora durante o dia, ao longo do ano. O preço da eletricidade comprada também varia de acordo com o horário de consumo. A tarifa de eletricidade,

obtida pela análise da fatura de energia elétrica, considera uma tarifa ao longo do dia (R\$129/MWh), com um horário diferenciado de “ponta”, entre 18h e 21h (R\$199/MWh). A tarifa de gás natural (R\$120/MWh – PBGAS, 2013) não contempla diferenciação horária nem sazonal, e caso algum equipamento que o utilize seja instalado, os custos já incluirão a conexão à malha de distribuição (gasodutos). Da mesma forma, a tarifa considerada para o diesel (R\$149/MWh) não possui discriminação horária ou sazonal, e os custos da instalação de equipamentos que operem com diesel incluem tanques de armazenagem.

A biomassa é um recurso energético disponível localmente, a preço muito baixo (R\$0,50/MWh), que praticamente cobre somente as despesas com transporte. Em alguns casos, como na construção civil local, resíduos de madeira estão disponíveis sem custo algum. Este tipo de resíduo pode ser utilizado diretamente em caldeiras para a produção de água quente e vapor, ao contrário de outras instalações, como padarias e pizzarias, que necessitam de um controle maior no material a ser queimado. A ideia por trás da inserção da biomassa na super-estrutura é a de reduzir a quantidade de biomassa inutilizada, que simplesmente é depositada a céu aberto em terrenos baldios. O próximo passo, a ser desenvolvido em uma publicação futura, é implementar tecnologias de gasificação de biomassa para diversificar ainda mais a super-estrutura e contar com a possibilidade de suprir gás de síntese (*syngas*) para motores e turbinas. Já que a biomassa é uma utilidade de baixo valor energético, seu armazenamento em grandes tanques é uma realidade que foi considerada.

A energia solar aqui considerada restringe-se, neste estudo, a coletores solares para a produção de água quente sanitária, já que estes sistemas se justificam quando a demanda por água quente é alta e estável e quando há altos custos com energia (RETSCREEN, 2007). O sistema de aquecimento de água constitui-se de coletores solares planos e reservatório térmico. Consultas ao fabricante foram o principal meio de obtenção de informações (SOLARTECH, 2013); estes coletores solares possuem área de abertura de 1,70 m<sup>2</sup> (R\$820/m<sup>2</sup>, incluindo o reservatório térmico e equipamentos auxiliares). Os custos de manutenção são baixos, para sistemas grandes como condomínios ou hospitais que requerem revisão mensal, R\$15,00/dia (inclui mão de obra, troca de anodos, eventuais reparos em bombas, etc.). O desempenho energético de um sistema solar de aquecimento de água depende de vários fatores: elementos de projeto (quantidade de radiação disponível), tipo de coletor (e.g., tubos de vácuo, concentrador, plano), área e eficiência, tipo de trajetória (*Sun tracking mode*, e.g., fixo, uni- ou bi-axial), a inclinação e o azimute.

A ideia de utilizar coletores solares para a produção de água quente em hospitais não é recente (Hinotani, Kanatani, Osumi, 1979): vários hospitais brasileiros já contam com sistemas de água quente via coletores solares, e.g., 1653 m<sup>2</sup> de coletores solares no Hospital das Clínicas (SP), 880m<sup>2</sup> no Hospital San Rafael (BA), 110 m<sup>2</sup> no Hospital Metropolitano (ES), 144 m<sup>2</sup> no Hospital Geral de Rio das Ostras (RJ), e 410 m<sup>2</sup> no Hospital São João de Deus (MG) (TUMA, 2013).

Informação sobre a distribuição da radiação solar foi retirada de CLIMATICUS 4.2 (2005), vide Fig. 3. Como pode ser observado, a radiação solar se mantém constante ao longo do ano. Os meses centrais (maio, junho, julho) concentram a maior parte da precipitação anual de João Pessoa (Mendonça, Danni-Oliveira, 2007) e recebem radiação com a inclinação mais desfavorável do ano; assim, a radiação solar global média é menor durante estes meses. Devido a localização geográfica do hospital, considera-se que os captadores são instalados com uma inclinação de 20°, para favorecer a circulação da água (Tavares, 2009). Portanto, a radiação global no plano do coletor se obtém após a correção dos valores de radiação solar global em plano horizontal. Por simplicidade, se consideram estes últimos valores, já que se desconhecem outros parâmetros de importância, como possíveis objetos que façam sombra sobre o campo de coletores.

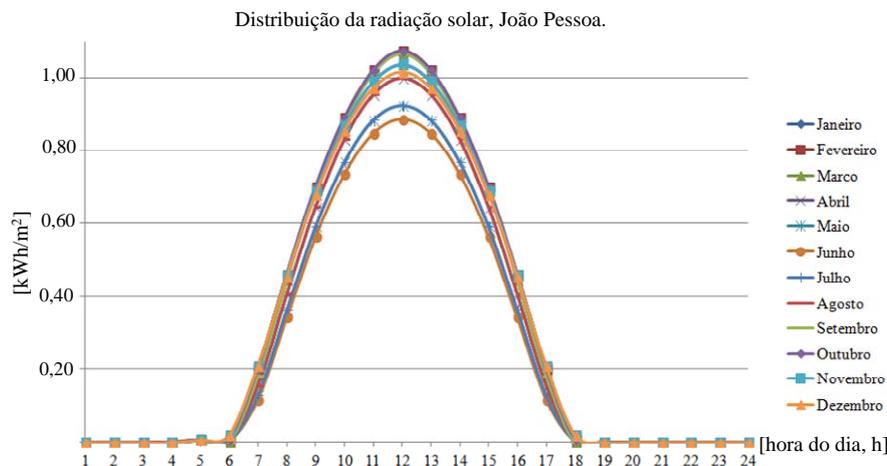


Figura 3 - Distribuição da radiação solar em plano horizontal em João Pessoa, Paraíba.

Para o cenário econômico e financeiro atual, considerando-se uma vida útil de 15 anos para o sistema e uma taxa de juros de 10% ao ano, obteve-se um fator de recuperação de capital (FRC) igual a 0,13/ano.

Um sistema de poligeração pode ser projetado para operar de maneira autônoma, mas a possibilidade de conexão à rede elétrica pode ser muito vantajosa para a venda de excedentes de eletricidade cogenerada, obtendo assim um benefício

econômico. A resolução normativa nº482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012) e a Norma de Distribuição Unificada NDU-015 (ENERGISA, 2012) estabelecem as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, determinando também o sistema de compensação de energia elétrica. Neste sistema, a energia excedente à consumida será injetada no sistema de distribuição e será registrada como créditos. Aqui se observa que a geração de eletricidade excedente não pode ser considerada uma fonte de renda, ao contrário do que pode acontecer na Espanha (Lozano et al., 2009).

O problema a ser resolvido consiste em duas etapas simultâneas: seleção da combinação de tecnologias, quanto ao tipo e potência instalada, que sejam capazes de satisfazer a todas as demandas energéticas do hospital, e estabelecimento do modo de operação dos equipamentos instalados para cada um dos intervalos de tempo definidos.

### 3 PROJETO ÓTIMO

Estabelecido o ambiente de instalação do sistema de poligeração e suas demandas energéticas, e de posse dos parâmetros técnicos, econômicos e legais, procede-se à formulação do modelo matemático. Elaborou-se um modelo de otimização baseado em PLIM, cuja solução permite conhecer o valor de todos os fluxos energéticos. A solução também fornece o resultado de uma avaliação econômica, selecionando a melhor configuração do sistema (tipo e número de equipamentos) e a maneira mais conveniente de operá-lo de modo a obter o mínimo custo.

O objetivo econômico foi definido de modo a se considerar o custo anual, que inclui tanto os custos fixos (investimento em equipamentos) quanto os custos variáveis (compra de utilidades para atender à demanda, custos de manutenção e operação). Dada a limitação de espaço, a seguir se inclui uma versão simplificada do modelo, em linguagem algébrica simples, correspondente ao problema de seleção de tecnologias:

$$\text{MINIMIZAR} \quad \text{Custo Anual} = (\text{Custos Fixos}) + (\text{Custos Variáveis}) \quad (1)$$

$$\text{Custos Fixos} = (\text{FRC}) \cdot (\text{FCI}) \cdot \left[ \sum_i \text{CINV}_i + \text{coletores} \right] \quad (2)$$

$$\text{Custos Variáveis} = (\text{Custo Gás Natural}) + (\text{Custo Biomassa}) + (\text{Custo Diesel}) + (\text{Custo Eletricidade}) - (\text{Creditos Eletricidade}) \quad (3)$$

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<sub>*i*</sub>) é igual ao número de equipamentos instalados para cada tecnologia *i* vezes o custo individual. FRC é o fator de recuperação de capital, introduzido anteriormente, e FCI é um fator de custos indiretos, que aglutina custos de engenharia, transporte, instalação, supervisão, taxas de serviço e contingência, totalizando 15% dos custos de investimento em equipamentos.

A matriz binária (0 = não; 1 = sim) de indicadores de possibilidades de compra, demanda, venda e desperdício (no caso de evacuação de calor excedente, por exemplo) está representada no conjunto (4), respectivamente, por INDCOM, INDDM, INDVEN e INDDES.

INDCOM	INDDM	INDVEN	INDDES		
1	0	0	0	(gás natural)	}
0	1	0	0	(vapor)	
0	1	0	0	(água quente)	
0	0	0	0	(água de refrigeração)	
0	0	0	1	(ar ambiente)	
0	1	0	0	(água fria)	
1	1	1	0	(eletricidade)	
1	1	0	0	(diesel)	
1	1	0	0	(biomassa)	

Para cada período de tempo, restringe-se a produção de energia à capacidade instalada. Para cada período de tempo, um balanço energético deve ser obedecido para cada utilidade:

$$\text{Produção} - \text{Consumo} + \text{Compra} - \text{Venda} - \text{Demanda} = 0 \quad (5)$$

Mais detalhes sobre o modelo básico (função objetivo, limites de capacidade, restrições de produção e equações de balanço dos equipamentos e do sistema como um todo) encontram-se em Carvalho (2011) e Romero, Carvalho e Millar (2014). A novidade apresentada aqui neste trabalho é a introdução de coletores solares na super-estrutura, para a produção de água quente. A equação (5) se modifica neste trabalho, incluindo um termo que representa a radiação neta absorvida (RNA) pelos coletores instalados, obtendo-se a equação (6):

$$\text{Produção} - \text{Consumo} + \text{Compra} - \text{Venda} - \text{Demanda} + \text{RNA} = 0 \quad (6)$$

$$\text{RNA} = \text{NPS} \cdot A \cdot \text{Rad} \cdot \eta \quad (7)$$

$$\text{NPS} = \text{NPI} \quad (8)$$

Na equação (7) define-se a radiação absorvida em cada instante pelo campo de coletores, onde  $A$  [ $\text{m}^2$ ] representa a superfície de cada coletor;  $\eta$  é a eficiência do coletor;  $\text{Rad}$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ,  $\text{J}/\text{m}^2$ ] é a radiação global por unidade de superfície em plano horizontal, devido a localização geográfica;  $\text{NPI}$  é o número de coletores instalados, e  $\text{NPS}$  é o número de coletores ativos em cada período de tempo considerado no balanço. Faz-se uso do  $\text{NPS}$  tomando-se estes valores sujeitos à equação (8) para representar o grau de utilização do campo de coletores.

O modelo de otimização compara todas as formas possíveis (dentro da superestrutura) de se atender as demandas energéticas do hospital, seja diretamente ou através de conversões únicas ou múltiplas de energia, hora-a-hora, ao longo do ano, obtendo um custo anual total para cada configuração e modo de operação possíveis. Assim, todos os balanços econômicos para todas as configurações viáveis contidas na super-estrutura de poligeração são comparados, resultando no mínimo custo anual (configuração ótima e o modo ótimo de operação).

#### 4 RESULTADOS

Dada a situação definida pelo conjunto completo de condições estabelecidas e o modelo de otimização, obtiveram-se os resultados que se mostram a continuação. A configuração de referência é aquela na qual toda a eletricidade se compra diretamente à rede elétrica, para satisfazer a demanda de eletricidade e a demanda de refrigeração através de chillers mecânicos. Aqui se impuseram restrições quanto aos equipamentos instalados, excluindo-se a possibilidade de cogeração e uso de energia solar e biomassa, para que a *configuração de referência* refletisse a maneira convencional de se atender às demandas energéticas.

O *ótimo econômico* foi obtido ao resolver-se o modelo PLIM, minimizando o custo anual e determinando-se os equipamentos e modo de operação dos mesmos ao longo do ano. Não houve restrições quanto às tecnologias que podiam ser instaladas. A Tab. 3 mostra a configuração e fluxos energéticos para o *sistema de referência* e o *ótimo econômico*.

Tabela 3 - Soluções para o cenário de referência e o ótimo econômico.

	Referência		Ótimo econômico	
<b>Composição do sistema</b>	Número (Potência instalada)		Número (Potência instalada)	
Grupo gerador a gás natural	- (0 MW)		0 (0 MW)	
Grupo gerador a diesel	- (0 MW)		0 (0 MW)	
Caldeira Vapor (GN)	1 (0,300 MW)		0 (0 MW)	
Caldeira Vapor (BM)	0 (0 MW)		1 (0,250 MW)	
Caldeira Vapor (EE)	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Trocador calor (VA-AQ)	1 (0,400 MW)		1 (0,400 MW)	
Caldeira Água Quente (GN)	1 (0,300 MW)		0 (0 MW)	
Caldeira Água Quente (BM)	0 (0 MW)		1 (0,170 MW)	
Caldeira Água Quente (EE)	1 (0,150 MW)		1 (0,150 MW)	
Trocador calor (AQ-AR)	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Máq. Ref. Absorção: Duplo efeito	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Máq. Ref. Absorção: Simples efeito	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Máq. Ref. Mecânica	3 (0,810 MW)		3 (0,810 MW)	
Torre de Refrigeração	1 (1,000 MW)		1 (1,000 MW)	
Coletores termo-solares	--		284 unidades	
Eletricidade importada	4281 MWh/ano		3357 MWh/ano	
Eletricidade vendida	--		--	
Gás natural importado	1528 MWh/ano		--	
Diesel importado	--		--	
Biomassa importada	--		1783 MWh/ano	
Investimento em equipamentos	R\$	936.675	R\$	1.351.316
Custo anual da eletricidade importada	R\$/ano	584.948	R\$/ano	465.777
Renda anual com eletricidade exportada	R\$/ano	--	R\$/ano	--
Custo anual do gás natural importado	R\$/ano	183.389	R\$/ano	--
Custo anual do diesel importado	R\$/ano	--	R\$/ano	--
Custo anual da biomassa importada	R\$/ano	--	R\$/ano	89.154
Custos de operação e manutenção	R\$/ano	41.792	R\$/ano	54.428
Custo anual do equipamento*	R\$/ano	121.768	R\$/ano	175.671
Custo anual TOTAL	R\$/ano	931.897	R\$/ano	785.030

\* vida útil do sistema 15 anos, taxa de juros 10%

A configuração de referência para o sistema de fornecimento e conversão de energia conta com a instalação de equipamentos convencionais: uma caldeira produzindo vapor a partir de gás natural, duas caldeiras produzindo água quente: uma a partir de gás natural e a outra a partir de eletricidade, um trocador de calor vapor-água quente, três chillers mecânicos e uma torre de resfriamento para evacuar o calor excedente. Este sistema compra anualmente 4281 MWh de eletricidade a rede elétrica, e compra também 1548 MWh de gás natural por ano.

Ao remover todas as restrições quanto à instalação de equipamentos, a solução ótima encontrada pode beneficiar-se de uma configuração menos tradicional, comprando biomassa (1783 MWh/ano) para o acionamento de caldeiras de vapor e água quente, com a complementação da água quente necessária originária de 284 coletores solares (1,7 m<sup>2</sup> cada  $\approx$  483 m<sup>2</sup> total). O sistema não instala máquinas de refrigeração por absorção, mantendo chillers mecânicos para atender à demanda de refrigeração. A mesma quantidade de calor é evacuada através das torres de refrigeração, calor esse oriundo dos chillers mecânicos.

A Tab. 4 resume os resultados econômicos do sistema de referência e do ótimo econômico. Observa-se um aumento no investimento inicial (igual a R\$ 414.641) da configuração de ótimo econômico, porém existe um benefício anual considerável na fatura energética: com livre escolha de tecnologias e possibilidades de utilização de energia solar e biomassa, economizam-se anualmente R\$ 146.867. Para a avaliação econômica desta mudança de sistema, desde um sistema de referência ao sistema de ótimo econômico, utilizam-se os métodos de Período de Recuperação do Investimento (PRI), o Valor Atual Líquido (VAL), e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Investindo-se numa configuração otimizada (junto com sua estratégia operacional ótima), o período de tempo necessário para recuperar o investimento extra foi de 2 anos e 10 meses, e se calculou um VAL = 211.031; como VAL > 0, esta mudança de sistema se considera rentável. Calculando-se a TIR, obteve-se um valor TIR = 35,03%, o que mais uma vez confirma que a mudança ao sistema ótimo é rentável.

Tabela 4 - Comparação entre o sistema de referência e o ótimo econômico.

	Sistema de referência	Ótimo econômico
Investimento em equipamentos	R\$ 936.675	R\$ 1.351.316
Faturação energética		
Custo da eletricidade	R\$ 584.948 / ano	R\$ 465.777 / ano
Custo do gás natural	R\$ 183.389 / ano	0
Custo da biomassa	-	R\$ 89.154 / ano
Custo de O&M	R\$ 41.942 / ano	R\$ 54.428 / ano
<i>Total</i>	R\$ 810.279 / ano	R\$ 609.359 / ano

Analisando a importância do fator de recuperação de capital (fator de amortização) na seleção das tecnologias, observou-se uma tendência ao variar este fator (valores: 0,07, valor base **0,13**, 0,20, 0,30 e 0,40): para fatores de amortização elevados (que implicam em uma maior aversão ao risco), a solução ótima instala menos coletores solares, enquanto que, à medida que o fator de amortização diminui (investindo-se na economia de energia), maior a proporção de água quente produzida via coletores solares.

No cenário econômico atual, somente com valores extremamente baixos de gás natural (metade do preço atual) ou diesel (ao redor de 30% do preço atual), é que a solução do modelo de otimização considera a importação destes combustíveis para acionar módulos de cogeração. No caso especial da cogeração a gás natural, o sistema pode injetar eletricidade na rede elétrica em momentos de demanda energética interna mais baixa, beneficiando-se do sistema de créditos da rede elétrica.

## 5 CONCLUSÕES

O estudo da viabilidade da implantação de uma instalação nova, juntamente com a otimização do seu projeto, depende fundamentalmente dos fatores técnicos e econômicos, que constituem o cenário de incorporação do sistema. Um cenário definido de maneira realista, da maneira mais completa possível, permite a análise de aspectos como emissões contaminantes, custos de instalação, possibilidades de se recuperar ou utilizar energia térmica, *etc.* A otimização do sistema energético que permite atender à demanda do hospital priorizou o aspecto econômico, minimizando o custo anual total.

Os métodos de programação linear mista inteira conseguem capturar a complexidade do plano de investimento em sistemas energéticos de poligeração, ao considerar uma super-estrutura que contém todas as alternativas, representando todas as opções de configuração e modos de operação possíveis para o sistema através de variáveis binárias, enquanto que os fluxos físicos e econômicos, expressam-se por variáveis contínuas.

Este trabalho mostrou o impacto econômico da incorporação de energias renováveis, inicialmente energia solar e biomassa, como possibilidades a serem consideradas no projeto de um sistema de fornecimento de energia. Nas condições atuais para João Pessoa (Brasil), a solução de ótimo econômico sugere que se instalem caldeiras a biomassa para melhor aproveitamento deste recurso energético tão barato. Ademais, o ótimo econômico também indica a instalação de coletores solares para a produção de água quente, que é complementada pela água quente das caldeiras.

Observou-se, em geral, pouca variabilidade nas configurações obtidas, nas quais a demanda de refrigeração sempre é atendida por chillers mecânicos. Na análise de sensibilidade econômica do fator de amortização, evidenciou-se

a velocidade de amortização como um fator muito influente na determinação da combinação adequada de tecnologias. Uma estratégia de investimentos que permita amortizações lentas incentivara o uso de coletores solares e biomassa, com grandes investimentos em equipamentos, mas com benefícios maiores a longo prazo.

Uma ampliação deste trabalho pode ser feita com a introdução de mais equipamentos na super-estrutura, como por exemplo uma turbina de biomassa, que possa aproveitar-se do baixo preço do recurso para a geração de eletricidade e/ou vapor. A biomassa também pode ser utilizada em gasificadores para a produção de *syngas*, ou mais adiante, em catalisadores do tipo Fischer-Tropsch para a produção de *syndiesel*. Equipamentos que funcionam com gás natural ou diesel podem ser adaptados para funcionamento com *syngas* ou *syndiesel*, e assim serem implementados na super-estrutura. A outra perspectiva de ampliação deste trabalho inclui a consideração de critérios ambientais, incorporando técnicas de análise e eco-projeto, baseadas na análise do ciclo de vida, para formular e quantificar critérios ambientais razoáveis, e assim identificar quais sistemas de poligeração são menos agressivos ao meio ambiente.

Trabalhos já em desenvolvimento pelos autores incluem a consideração de armazenamento térmico, no qual a água quente pode ser produzida sempre ao longo do dia e armazenada para uso durante a noite, caso esta estratégia resulte em um custo mínimo anual.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2012. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em 27/12/2013.
- Araújo, M. M. D., 2004. Contribuição Metodológica para o Diagnóstico Exergético de Sistemas Térmicos e Elétricos - Estudo de Caso do Hospital Universitário Lauro Wanderley, Dissertação de Mestrado, DEM, UFPB, João Pessoa.
- Arcuri, P., Florio, G., Fragiaco, P., 2007. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex, *Energy*, vol. 32, n. 8, pp.1430-1447.
- Basrawia, F., Yamadab, T., Obarac, S., 2013. Theoretical analysis of performance of a micro gas turbine co/trigeneration system for residential buildings in a tropical region, *Energy and Buildings*, vol. 67, pp. 108–117.
- Carvalho, M., 2011. Thermo-economic and environmental analyses in the synthesis of polygeneration systems for the residential-commercial sector. Disponível em <<http://zaguan.unizar.es/record/5744/files/TESIS-2011-025.pdf>> Acesso em 27/12/2013.
- CLIMATICUS 4.2 - Software versão beta. Banco de dados Climáticos. Estratégias de projeto 58 cidades brasileiras. Base de dados do INMET 1961-1990. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - Departamento de Tecnologia - Laboratório de conforto ambiental e eficiência energética, 2005. Disponível em <[www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus\\_4\\_2.xls](http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_4_2.xls)>, consultado em 29/11/2013.
- ENERGISA, 2012. NDU 015: Critérios para Conexão de Acessantes de Geração Distribuída - Conexão em Média Tensão. Disponível em <[http://www.energisa.com.br/paraiba/pdfedoc/Normas\\_Tecnicas/ndu015.pdf](http://www.energisa.com.br/paraiba/pdfedoc/Normas_Tecnicas/ndu015.pdf)> Acesso em 27/12/2013.
- Erbs, D.G., Klein, S.A., Beckman, W.A., 1983. Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures, *ASHARE Journal*, vol. 25, n. 6, pp. 60-65.
- França, A. F. R. T., Caseiro, L.P.V.C., 2008. Cogeração e Trigeração, Planejamento e Produção de Electricidade, Departamento de Eng. Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Freschi, F., Giaccone, L., Lazzeroni, P., Repetto, M., 2013. Economic and environmental analysis of a trigeneration system for food-industry: A case study, *Applied Energy*, vol. 107, pp. 157–172.
- Garcia, X., 2006. Analysis of building energy regulation and certification in Europe. Their role, limitations and differences, *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 381-392.
- Hinotani, K., Kanatani, K., Osumi, M., 1979. An evacuated glass tube solar collector and its application to a solar cooling, heating and hot water supply system for the hospital in Kinki University, *Solar Energy*, vol. 22, n. 6, pp. 535–545.
- Lozano, M. A., Ramos, J. C., Carvalho, M., Serra, L.M., 2009. Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings, *Energy and Buildings*, vol. 41, n. 10, pp. 1063-1075
- Marimón, M. A., Arias, J., Lundqvist, P. C., Bruno, J. C., Coronas, A., 2011. Integration of trigeneration in an indirect cascade refrigeration system in supermarkets, *Energy and Buildings*, vol. 43, n. 6, pp. 1427–1434.
- Mendonça, F., Danni-Oliveira, I. M., 2007. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil, Oficina de Textos.
- Nepote, M. H. A., Monteiro, I. U., Hardy, E., 2009. Associação entre os índices operacionais e a taxa de ocupação de um centro cirúrgico geral, *Rev. Latino-Am. Enfermagem* [online], vol. 17, n.4.
- PBGÁS – Companhia Paraibana de Gás. Tarifas. Disponível em <[http://www.pbgas.com.br/?page\\_id=1477](http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477)>. Acesso em 24/12/2013.
- RETSCREEN – Natural Resources Canada, 2007. Solar Water Heating Project Analysis. Clean Energy Project Analysis Course.
- Ren, H., Gao, W., 2010. A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems, *Applied Energy*, vol. 87, n. 3, pp.1001-1014.

- Romero, A., Carvalho, M., Millar, D. L., 2014. Application of a polygeneration optimization technique for a hospital in Northern Ontario, Transactions of the Canadian Society of Mechanical Engineering, vol. 1.
- Rubio-Maya, C., Uche, J., Martinez, A., 2011. Sequential optimization of a polygeneration plant, Energy Conversion and Management, vol. 52, n. 8–9, pp. 2861–2869.
- Serra, L.M. et al, 2009. Polygeneration and efficient use of natural resources, Energy, vol. 34, pp. 575-586.
- SOLARTECH. Tecnologia de energia limpa. Disponível em: <<http://www.solartechbr.com.br/>>. Acesso em 24/12/2013.
- Shang, Z., Kokossis, A., 2005. A systematic approach to the synthesis and design of flexible utility systems, Chemical Engineering Science, vol. 60, pp. 4431-4451.
- Tavares, C., 2009. Proposta de regulamento de desempenho termo-energético de edificações para a cidade de João Pessoa – PB. Uma Aplicação à Estação Ciência, Cultura e Artes. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <[http://bdtd.biblioteca.ufpb.br/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=226](http://bdtd.biblioteca.ufpb.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=226)>. Acesso em 17/02/2014.
- TUMA, 2013. Aquecedor solar para hospital. Grandes obras de aquecimento solar para hospitais. Disponível em: <<http://www.aquecimentosolartuma.com.br/hospitais>>. Acesso em 24/12/2013.
- Yokoyama, R., Hasegawa, Y., Ito, K., 2002. A MILP decomposition approach to large scale optimization in structural design of energy supply systems, Energy Conversion and Management, vol. 43, n. 6, pp. 771-790.
- Ziher, D., Poredos, A., 2006. Economics of a trigeneration system in a hospital, Applied Thermal Engineering, vol. 26, n. 7, pp. 680-687.

## BIOMASS AND SOLAR THERMAL ENERGY IN THE SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF POLYGENERATION SYSTEMS

**Abstract.** *The optimal synthesis of a polygeneration system can be obtained from information on the energy demands of the consumer center, based on the technical characteristics of the equipment and on the energy resources available. The optimal design comprehends the optimal configuration of the system to be installed as well as the optimal operation mode throughout the year, considering energy flows at market prices and utilizing the productive capacity of the installed equipment. The optimization model compares the annual economic balances for all the feasible configurations of the system through a polygeneration superstructure. A hospital located in João Pessoa, Paraíba, Brazil, was considered herein. The energy services considered were electricity, heat (hot water and laundry), steam (sterilization), and coolth (air-conditioning). Commercially available equipment were considered, from the most conventional (diesel engines) to the least usual (absorption chillers), and renewable energy resources were included in the form of biomass and solar thermal energy. An objective function is minimized, always meeting the energy demands of the consumer center. The optimal synthesis is obtained as a result of the solution of a mixed integer linear programming model, in which the objective function was the annual cost (R\$/year). For the actual scenario defined in João Pessoa, the optimal solution included the utilization of biomass as an energy resource, besides the installation of 284 flat plate solar collectors for the production of hot water, resulting in annual savings of R\$ 146,867 in comparison with the traditional system. It was observed that an investment strategy that allows for slow amortizations will incentivize the use of solar collectors and biomass, with high investments in equipment, but with considerable benefits in the long term.*

**Key words:** polygeneration, biomass, solar energy, optimization, linear programming.