

ANÁLISE COMPARATIVA DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS EM UMA MICRORREDE ATENDIDA POR UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO PRECÁRIA

CLODOALDO DE B. LAMBIASE*, FLÁVIO A. B. LEMOS*, SÉRGIO HAFFNER*,

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Av. Osvaldo Aranha, 103. CEP: 90035-190
Porto Alegre, RS, Brasil*

Emails: *clodoaldo.lambiasse@ufrgs.br, flavio.lemos@ieee.org, haffner@ieee.org*

Abstract — The technical and economic advantages offered by the inclusion of alternative energy sources in a grid-tie installation are evaluated in this paper. As the initial system configuration has limitations to meet the power and energy demands, seven alternatives are proposed and evaluated, including different combinations of generation systems using alternative sources. Electric system operation was modelled, simulated and analysed in TRNSYS, and energy production estimated in one year period, with the resource hourly details considering actual estimates and localized to the availability of wind and photovoltaic resources. The reference topology includes only a diesel generator set; other evaluated topologies include wind, photovoltaic and hydrogen fuel cell energy resources, using a microgrid for different integrated sources to the existing installation. Each evaluated topology has its own characteristics and two of them performed better results compared to reference energy solution.

Keywords — alternative energy sources, microgrid, TRNSYS, distribution network.

Resumo — Neste trabalho, as vantagens técnicas e econômicas proporcionadas pela inclusão de fontes alternativas de energia em uma instalação conectada ao sistema elétrico por intermédio de uma rede de distribuição precária são avaliadas. Como o sistema na configuração inicial apresenta limitações para o atendimento das demandas de potência e energia, foram propostas e avaliadas sete alternativas, incluindo diferentes combinações de sistemas de geração empregando fontes alternativas. O sistema foi modelado e simulado no TRNSYS, o que permitiu analisar a operação, estimar a potência e energia produzidas, no período de um ano, com detalhamento horário de cada recurso considerando estimativas reais e localizadas para a disponibilidade dos recursos eólicos e fotovoltaicos. A topologia de referência inclui apenas um grupo gerador diesel; as demais topologias avaliadas contemplam inclusão de recursos eólicos, fotovoltaicos e célula de combustível a hidrogênio, sendo utilizada uma microrrede para a integração destas diferentes fontes à instalação existente. Cada topologia avaliada apresentou características únicas e duas delas obtiveram melhor desempenho em comparação a solução energética de referência.

Palavras chave — fontes alternativas de energia, microrrede, TRNSYS, redes precárias.

1 Introdução

Nas últimas décadas, o uso de Fontes de Energia Renovável (FERs) tem se intensificado para suprir necessidades energéticas em países em desenvolvimento (Buran *et al.* 2003). Alguns fatores que contribuíram para o aumento foram a redução nos custos dos equipamentos envolvidos na geração de ER, a possibilidade de uso em microgeração e o baixo nível de poluição local gerada pelo equipamento.

Fontes Alternativas de Energia (FAEs), enquadradas em micro e minigeração, têm sido estudadas e utilizadas para o fornecimento de energia em locais isolados ou atendidos por redes limitadas. No primeiro caso a geração local de energia é utilizada como fonte principal de fornecimento. No segundo caso, devido a precariedade da rede elétrica, seja pela limitação do alimentador na Subestação de Energia (SE) ou pela grande extensão da rede de distribuição primária, as fontes alternativas são utilizadas como complemento à energia fornecida pela concessionária.

Em ambos os casos são necessárias a interligação e a combinação de diferentes FAEs, o que têm contribuído para o incremento no interesse da utilização de microrredes. Algumas

vantagens das microrredes são a possibilidade de operação em ilha ou interconectada e a redução do nível de dependência da distribuidora de energia elétrica (EE).

Uma parte importante no projeto e operação de uma microrrede é a simulação das diversas condições de geração (tipos de fontes, potência e despacho) para atender a demanda. Uma pesquisa bibliográfica permite encontrar várias soluções para auxiliar nesta tarefa. Dufo-López e Bernal-Agustín (2005), também criadores do software de simulação HOGA, estudaram o fornecimento de energia elétrica para diferentes perfis de carga através de um sistema híbrido. Foram realizados comparativos entre sistemas híbridos e sistemas exclusivamente com Painéis Fotovoltaicos (PV). A topologia escolhida continha PV, Grupo Gerador Diesel (GGD) e baterias para o armazenamento. Essa topologia desconsiderava as células de combustível e as turbinas eólicas, uma das mais promissoras FERs.

Boonbumroong *et al.* (2011) incentivam o uso de barramento em corrente alternada (CA) para o acoplamento das FAEs e executam simulações nos softwares TRNSYS e HOMERpro. Karavas *et al.* (2015) e Kyriakarakos *et al.* (2011, 2013) inseriram múltiplas FERs na topologia simulada no TRNSYS, diferenciando-se entre si pelo sistema de controle.

A topologia escolhida contou com PVs, turbina eólica, célula de combustível, equipamento de eletrólise e banco de baterias. A utilização de múltiplas FERs adicionou segurança e autonomia ao sistema apesar do crescimento de sua complexidade. Foi realizado um comparativo dessa solução com um sistema gerador diesel mais baterias em um intervalo de vinte anos. A solução mostrou-se economicamente atrativa, mas o perfil de carga avaliado era de baixo consumo.

No presente trabalho é realizada a análise das vantagens econômicas da inclusão de FERs em uma instalação elétrica hipotética atendida por uma rede precária, limitada a 300 kVA de contrato de demanda, e que possui um grupo gerador diesel pré-existente. São estudadas diferentes topologias com diferentes combinações entre energia eólica, solar e célula de combustível, sempre em conjunto com o GGD. Os geradores diesel tem capacidade para atender a integralidade da carga e sua presença, em todas as topologias, tem a finalidade de evidenciar o incremento econômico que a redução do seu uso proporciona em decorrência do despacho prioritário das fontes de energia renovável. A análise da operação dos sistemas é realizada durante o período de um ano, com detalhamento horário, sendo considerada a variação da disponibilidade de cada um dos recursos energéticos em função dos dados climáticos da localidade da instalação, das horas do dia e época do ano.

2 Simulação e Análise das Alternativas

2.1 Projeto da Microrrede

As FAEs utilizadas neste trabalho foram: PVs, aerogeradores, célula de combustível e grupo gerador diesel. Os diferentes arranjos factíveis a partir de suas combinações estão apresentadas na Tabela 1, onde são mostradas as fontes disponíveis em cada uma das sete topologias analisadas, representadas pelos números de I a VII.

Tabela 1 - Tipos de Topologias

Fonte Geradora	Topologia						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Grupo Gerador Diesel	X	X	X	X	X	X	X
Eólica		X		X	X		X
Fotovoltaica			X	X		X	X
Eletrólise/célula combustível					X	X	X

A Topologia I, constituída apenas pelo GGD, é a situação pré-existente e consequentemente foi o projeto de referência para a comparação com os demais sistemas. Por este motivo os geradores estão presentes em todas as outras topologias analisadas a fim de proporcionar a avaliação dos benefícios no desempenho decorrente da inclusão das FAEs.

As topologias subsequentes baseiam-se na Topologia I dispondo de ao menos uma FER incorporada. Uma solução para o problema de integração eficiente de diferentes unidades geradoras passa pela estruturação de um sistema utilizando o conceito de microrredes. O esquemático da solução proposta

para a integração das fontes de energia disponíveis nesse trabalho, Topologia VII, é apresentado na Figura 1. Um barramento em CA foi escolhido por apresentar algumas vantagens conforme (Kyriakarakos *et al.* 2011):

- habilidade em utilizar geração distribuída com fontes de energias renováveis;
- facilidade em expansões futuras;
- possibilidade de operação tanto em ilha como interconectado ao sistema de distribuição;
- possibilita a implantação de geração distribuída em pequenos povoados com consumidores dispersos.

As topologias analisadas possuem um contrato de demanda com a distribuidora limitado à 300 kVA em virtude da potência do transformador (300 kVA) e das limitações da rede precária. O padrão de consumo da carga do sistema a ser simulado e analisado é um ciclo diário dividido em quatro patamares básicos (discretos) conforme a Figura 2. O nível mínimo de consumo corre durante a madrugada e é da ordem de 100 kW enquanto que o patamar máximo de 1040 kW ocorre entre as 18 e 21 horas. Nas horas do dia remanescentes, a potência consumida oscila entre 300 e 600 kW.

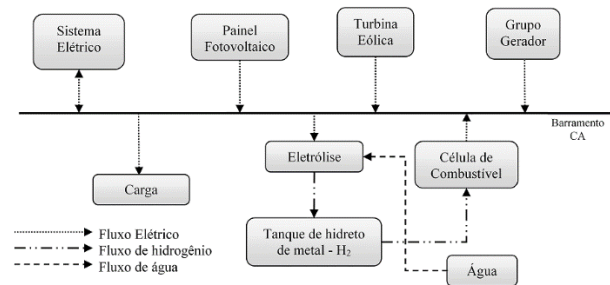


Figura 1 - Esquemático de uma solução contendo todos os equipamentos

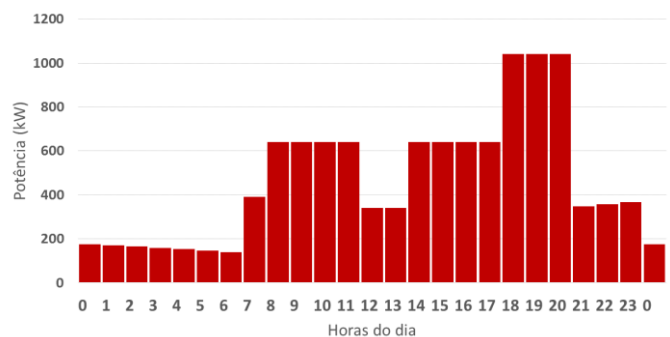


Figura 2 - Perfil de carga horário em um dia típico

2.2 Simulação

O software escolhido para a construção do objeto de simulação foi o TRNSYS (*Transient System Simulation Tool*) mantido pela *University of Wisconsin-Madison* (Solar Energy Laboratory *et al.* 2006). O TRNSYS foi escolhido por ser um

software extremamente flexível graficamente que possibilita a simulação de sistemas contendo ERs. Outra vantagem é a sua arquitetura aberta, em que é permitido ao usuário criar novos componentes ou alterar os códigos fonte, em Fortran, dos componentes existentes (Sinha e Chandel 2014).

A solução proposta no esquemático da Figura 1 foi implementada com os componentes existentes no TRNSYS:

- turbina eólica (type90);
- painéis fotovoltaicos (type180e);
- eletrólise (type160);
- célula de combustível (type173);
- gerador diesel (type120);
- controlador para microrrede (type105).

O *type105* é um componente oferecido para o controle de sistemas de potência que integram FAEs. O controlador executa decisões segundo o balanço energético do barramento de potência da microrrede, sendo a potência líquida no barramento dada por:

$$P_{barra}(t) = P_{Fotovoltaica}(t) + P_{Eólica}(t) + N_{Ger}P_{Ger}(t) + P_{CC}(t) - P_{Carga}(t) - P_{Eletrólise}(t) \quad (1)$$

onde, para cada instante de tempo t , $P_{Fotovoltaica}(t)$ é a potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos, $P_{Eólica}(t)$ é a potência fornecida pelos aerogeradores, $P_{CC}(t)$ é a potência fornecida pela célula combustível, $P_{Ger}(t)$ é a potência fornecida por cada gerador individualmente, $N_{Ger}(t)$ é o número de geradores acionados operando em paralelo, $P_{Carga}(t)$ é a potência demandada pela carga e $P_{Eletrólise}(t)$ é a potência consumida pelo processo de eletrólise.

O passo de integração do software é de uma hora e a cada passo da simulação a ordem de despacho utilizada obedece a seguinte sequência: fonte fotovoltaica/eólica, célula de combustível e gerador diesel.

A solução numérica para cada passo no software é realizada pelo método da substituição sucessiva (Burden e Faires 2008). A cada iteração as saídas obtidas para um determinado modelo são substituídas na entrada do modelo seguinte e então são realizados os cálculos pertinentes às equações desse modelo. As saídas obtidas desse modelo são então substituídas na entrada do próximo modelo e esse processo continua até que a variação de cada saída seja inferior a tolerância estipulada. Nesse momento o *kernel* do TRNSYS considera que a convergência foi atingida e passa para o próximo passo (Solar Energy Laboratory *et al.* 2006).

As simulações foram realizadas para um ano de operação (8760 horas), o intervalo de simulação compreendeu os meses de janeiro até dezembro, e foram utilizados os dados climáticos, dados de incidência solar e velocidade dos ventos, provenientes do ano meteorológico típico da cidade de Porto Alegre-RS.

2.3 Avaliação Econômica

A etapa de avaliação econômica é o estágio subsequente à finalização da modelagem do sistema. As dimensões dos equipamentos a serem adquiridos, os insumos consumidos e os bens produzidos são contabilizados no fluxo de caixa do modelo construído.

O custo efetivo de cada equipamento envolve o custo de aquisição e a manutenção/operação ao longo de um período de vinte anos de funcionamento. Os valores do fluxo de caixa de cada ano do período compreendido são idênticos numericamente mas diferem quando aplicada a taxa de desconto para obtenção do seu valor presente.

A comparação econômica entre os cenários avaliados foi realizada com o auxílio do Valor Presente Líquido (VPL) e os seus resultados constam da seção de Avaliação Econômica. As variáveis que representam o custo total da opção completa nesse trabalho, Topologia VII, podem ser visualizadas em (2).

$$\begin{aligned} C_{TOTAL} = & C_{AQU_UPS} + C_{O\&M_UPS} + C_{AQU_GER} + C_{O\&M_GER} \\ & + C_{AQU_PV} + C_{O\&M_PV} + C_{AQU_TURB} \\ & + C_{O\&M_TURB} + C_{AQU_EL} + C_{O\&M_EL} \\ & + C_{AQU_CC} + C_{O\&M_CC} + C_{AQU_TQH2} \\ & + C_{O\&M_TQH2} + C_{COMBUSTÍVEL} \\ & + C_{CONCESS} \end{aligned} \quad (2)$$

onde C_{AQU} representam os custos com aquisição e $C_{O\&M}$ representam os custos com operação e manutenção.

3 Análise dos Resultados

Com a finalidade de satisfazer a demanda da instalação, representada pela Figura 1 foram dimensionados os equipamentos para cada topologia estudada. As topologias foram agrupadas conforme a utilização ou não do processo de eletrólise que possui mais equipamentos e características distintas de operação. Todas as topologias utilizaram 4 geradores de 300 kVA para segurança energética do sistema. Os parâmetros dos outros equipamentos e as configurações das topologias constam das Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Parâmetros da Simulação dos modelos sem Eletrólise

Especificação/Topologia	I	II	III	IV
Potência máxima da turbina eólica (kW)	-	605	-	605
Número de Turbinas Eólicas	-	2	-	2
Potência total instalada dos painéis fotovoltaicos(kWp)	-	-	1200	1200
Demanda Contratada Ponta(kVA)/Fora de Ponta(kVA)	140/175	300/300	295/300	300/300

Tabela 3 - Parâmetros da Simulação dos modelos com Eletrólise

Especificação/Topologia	V	VI	VII
Capacidade de armazenamento do tanque de H ₂ (m ³)	100	100	100
Potência do equipamento de eletrólise (kW)	120-500	120-500	120-500
Potência da célula de combustível (kW)	60-300	60-300	60-300
Potência máxima da turbina eólica (kW)	605	-	605
Número de turbinas eólicas	2	-	2
Potência total instalada dos painéis fotovoltaicos (kWp)	-	1200	1200
Demanda Contratada Ponta(kVA)/Fora de Ponta(kVA)	300/300	300/300	300/300

As Tabelas 4 e 5 resumizam os resultados das simulações realizadas, sendo que em todos eles a energia total demandada pela instalação foi de 4,19 GWh, exceto para os sistemas que contemplam o processo de eletrólise. Nesse caso, os valores indicados em “processo de eletrólise” da Tabela 5 também são considerados como cargas a serem supridas pelo balanço energético.

Tabela 4 - Resultados Numéricos dos Cenários Avaliados sem Eletrólise

Geração	Topologia			
	I	II	III	IV
Fotovoltaica(MWh)	-	-	1.523	1.523
Eólica(MWh)	-	1.192	-	1.192
Gerador(MWh)	3.395	2.225	1.898	1.361
Saldo Concessionária(MWh)	-797	-828	-832	-377

Tabela 5 - Resultados Numéricos dos Cenários Avaliados com Eletrólise

Geração	Topologia		
	V	VI	VII
Fotovoltaica(MWh)	-	1.523	1.524
Eólica(MWh)	1.192	-	1.192
Gerador(MWh)	1.757	1.555	765
Processo de Eletrólise(MWh)	1.825	1.970	1.932
Célula de Combustível(MWh)	887	943	890
Saldo Concessionária(MWh)	-2.184	-2.140	-1.817

A seguir são apresentadas as sete topologias, conforme descrito na Tabela I. Para cada topologia é realizada uma análise técnica do comportamento da geração de cada fonte de energia.

3.1 Topologia I: GGD

A solução energética comumente empregada para o fornecimento de energia elétrica ainda é o gerador a diesel. A Topologia I é constituída apenas com os geradores diesel para que as outras opções propostas sejam comparadas com uma solução energética de referência.

O objetivo do sistema é fornecer no mínimo a potência demandada pela carga que excede os 300 kVA de capacidade da conexão com a concessionária, ou seja, os geradores

complementam a potência disponibilizada pela rede da concessionária. Nos momentos em que ocorre excesso de geração, o saldo positivo de potência é injetado na rede da concessionária, sempre limitado ao valor do contrato de demanda da unidade consumidora.

Nas simulações os geradores foram despachados sempre na potência máxima de trabalho conforme a demanda da carga. Para gerar 3,39 GWh de energia os geradores operaram por 11.315 horas e consumiram aproximadamente 845 mil litros de diesel. A fim de complementar a necessidade energética da carga foram consumidos aproximadamente 800 MWh da distribuidora.

3.2 Topologia II: grupo gerador diesel e geração eólica

A segunda topologia estudada foi constituída dos geradores presentes na Topologia I com a inclusão de duas turbinas eólicas de 605 kWp cada uma. A energia gerada pelas turbinas era despachada primeiro, na sequência a conexão com a distribuidora era acionada até o limite de 300 kVA e se persistisse a necessidade de mais energia o GGD era requisitado.

A inclusão dessa fonte de energia alternativa reduziu a energia total fornecida pelo GGD, com relação a Topologia I, e consequentemente reduziu o número de horas, relacionado ao custo de operação/manutenção, e o consumo de combustível.

3.3 Topologia III: grupo gerador diesel e geração fotovoltaica

Nessa topologia foram adicionados 1200 kWp em painéis fotovoltaicos na Topologia I. O uso de painéis fotovoltaicos como FER apresentou características diferentes da Topologia II que contava com a turbina eólica nessa função. A redução na utilização do GGD foi mais acentuada frente ao sistema II em razão da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos instalados terem sido aproximadamente 331 MWh maior do que a geração eólica.

Esse incremento na ER gerada reduziu a energia complementar requisitada, o tempo de operação, o combustível consumido e os custos envolvidos com manutenção e operação do GGD.

3.4 Topologia IV: grupo gerador diesel, geração fotovoltaica e geração eólica

As características distintas das duas FERs utilizadas, eólica e fotovoltaica, por vezes se complementam, o que explica os bons resultados encontrados para essa simulação. A importação de energia elétrica da distribuidora e a fornecida pelo GGD foram reduzidas significativamente em comparação às Topologias I, II e III.

Enquanto o período de geração da fonte fotovoltaica é predominantemente durante as horas de incidência solar mais intensa, a fonte eólica tem o seu perfil de geração mais distribuído durante o dia e a noite. O perfil resultante da

sobreposição dessas duas fontes contempla a geração por mais horas do dia e consequentemente uma redução do uso dos geradores com mais horas de injeção de energia na rede da concessionária.

As Topologias I, II, III e IV estudadas não contam com processo de eletrólise e as Topologias V, VI e VII, analisadas a seguir, são diferentes por incluírem o processo de eletrólise da água.

A eletrólise da água retira o hidrogênio e armazena em forma de gás em tanques pressurizados. Posteriormente esse gás é utilizado por uma célula de combustível para gerar energia elétrica e alguns subprodutos como água e calor. Esse ciclo possui características distintas pela sua eficiência próxima dos 48%, pelos subprodutos fornecidos e pela sua função que é a de armazenamento de energia.

3.5 Topologia V: grupo gerador diesel, processo de eletrólise, célula de combustível e geração eólica

A Topologia V avaliou a operação do processo de eletrólise em conjunto com o GGD e turbinas eólicas. A rede da concessionária foi mais exigida do que nas topologias sem eletrólise, resultando em 2184 MWh de energia importada da distribuidora, devido ao procedimento de produção de hidrogênio ser considerado como uma carga para o sistema.

A inclusão da unidade de *backup* não apresentou melhorias significativas em relação às topologias sem esse armazenamento. Uma vantagem técnica seria a contribuição para controle de transientes, conforme (Kyriakarakos *et al.* 2011).

3.6 Topologia VI: grupo gerador diesel, processo de eletrólise, célula de combustível e geração fotovoltaica

A inclusão de uma FER fotovoltaica, em substituição a fonte eólica da Topologia V, provocou poucas alterações no resultado do balanço energético. Em uma análise criteriosa pode-se elencar a redução no uso do GGD e na importação de energia da concessionária. Entretanto, ocorreu uma elevação no uso do processo de eletrólise que resultou em uma eficiência menor do sistema frente a Topologia V.

3.7 Topologia VII: grupo gerador diesel, processo de eletrólise, célula de combustível, geração eólica e geração fotovoltaica

Nessa topologia são utilizados todos os equipamentos disponíveis: GGD, equipamento de eletrólise, célula de combustível, painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, conforme dia típico de operação apresentado na Figura 3. Na figura é possível perceber dois períodos de funcionamento com características técnicas importantes. O primeiro período compreende o intervalo entre as oito e dezessete horas, momento em que as fontes eólica e fotovoltaica estão na sua maior geração de energia. Nesse período ocorre a injeção de potência na rede da concessionária, os geradores diesel e a CC

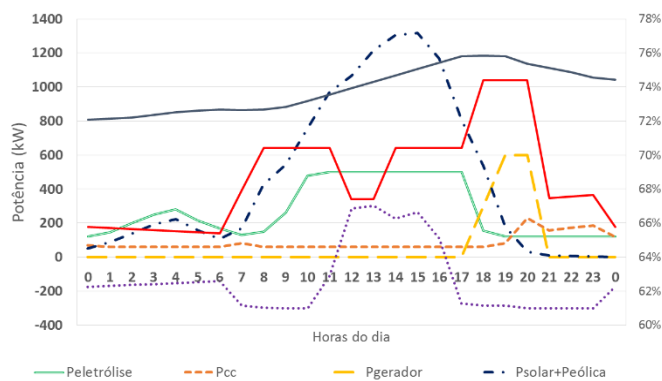


Figura 3 - Perfil de geração/consumo com as três fontes de energias renováveis e o gerador diesel

não estão ativos e a potência em excesso é armazenada na forma de H_2 pelo processo de eletrólise.

Em um segundo período, compreendido entre as dezessete e vinte e uma horas, ocorre o decréscimo da produção das fontes eólica e fotovoltaica concomitantemente a uma elevação da potência demanda pela carga. Nesse período o GGD e a CC precisam ser acionados, substitui-se a injeção pela importação de energia da rede da concessionária e o processo de eletrólise retorna ao modo de espera.

Em comparação com as Topologias V e VI, o uso dos geradores diesel e a quantidade de energia importada da distribuidora foram reduzidos em decorrência da operação das duas FERs simultaneamente: eólica e fotovoltaica.

As Topologias V e VI finalizaram o ano de simulação com apenas 20% do nível do tanque de hidrogênio preenchido. Enquanto a Topologia VII finalizou o ano com os mesmos 80% iniciais. Ou seja, as Topologias V e VI consumiram todo o potencial pré-existente sem proceder com a reposição ao final do ano. Essa reposição do nível de H_2 representa um potencial de geração de 50 MWh e isso explica a redução da eficiência do processo de eletrólise de 48% (Topologias V e VI) para 46% na Topologia VII.

4 Avaliação Econômica

O resultado da avaliação econômica das topologias encontra-se nas Tabelas 6 e 7, onde foram considerados os custos com aquisição, operação/manutenção e compra da energia elétrica da concessionária em um período de vinte anos. Utilizou-se o VPL apresentado pela topologia de referência (Topologia I) como comparativo econômico entre os sistemas avaliados. As topologias que apresentaram valores positivos na Tabela 7 são aqueles que obtiveram custo final menor que o custo apresentado pela Topologia I. E por este motivo o custo da Topologia I nesse comparativo é zero.

A Topologia II demonstrou ser a mais atrativa economicamente quando comparada aos arranjos concorrentes, apesar disso, não apresentou o menor custo em nenhum dos itens separadamente.

Tabela 6 - Decomposição dos custos para o VPL (em milhões de R\$)

Topologia /Custos	O&M	Demanda Ativa	Consumo de EE	Invest.	TOTAL
I	21,468	0,297	3,841	0,791	26,398
II	14,118	0,586	3,992	6,357	25,053
III	12,472	0,579	4,011	8,374	25,436
IV	10,654	0,586	1,818	13,940	26,998
V	13,083	0,586	10,532	9,628	33,829
VI	10,737	0,586	10,316	11,645	33,284
VII	7,411	0,586	8,763	17,211	33,971

Entretanto, o conjunto dos custos envolvidos como a redução imposta nas horas de uso e no consumo de combustível do GGD, o custo de aquisição dos equipamentos pouco elevado e despesas com O&M similares aos valores apresentados pelas opções concorrentes foram os quesitos responsáveis por tornar a Topologia II a opção mais atrativa economicamente.

Tabela 7 - Avaliação Econômica

Topologia	COMPARATIVO (Gerador)
I	R\$ 0,00
II	R\$ 1.344.416,00
III	R\$ 961.999,00
IV	-R\$ 600.356,00
V	-R\$ 7.431.122,00
VI	-R\$ 6.886.575,00
VII	-R\$ 7.573.057,00

A Topologia I que conta somente com os geradores diesel não foi a mais atrativa, apesar de ter um custo de investimento baixo, devido ao GGD ser um equipamento que consome muitos recursos a longo prazo em virtude do custo de manutenção e de combustível. Um bom desempenho técnico foi apresentado pela Topologia III mas não foi suficiente para ultrapassar a Topologia II, a mais atrativa economicamente.

Existe uma diferença de custos acentuada entre as soluções com processo de eletrólise e as demais soluções sem esse processo. A razão disso é pela eficiência inferior dos equipamentos de eletrólise e o seu alto custo de aquisição e manutenção.

5 Conclusão

Neste trabalho foram avaliadas possíveis formas de integração de diferentes fontes alternativas de energia para constituir uma microrrede. Foram simuladas sete tipos de topologia para atender o consumo da microrrede, considerando que esta microrrede possui um contrato de demanda de 300 kVA com a concessionária. A topologia I é constituída da interligação com a concessionária e a operação de geradores diesel para suprir a

diferença do consumo. Esta é a condição original de operação e foi utilizada para a comparação com as demais topologias.

Constatou-se que a Topologia II, composta por geradores diesel e turbinas eólicas, é a topologia mais atrativa economicamente. Embora a Topologia I tenha um custo de investimento, no que se refere a compra e instalação, muito inferior às demais topologias, a longo prazo ela é uma opção de preço elevado devido ao alto valor de manutenção e pelo incremento no consumo de combustível frente as outras opções. As topologias que incluem o processo de eletrólise apresentaram um custo muito elevado em comparação com as topologias sem unidade de *backup* para armazenamento local. Isto é devido ao fato da baixa eficiência da produção de hidrogênio e seu posterior consumo para geração de eletricidade.

Algumas das vantagens da abordagem, via fontes alternativas de energia, para satisfazer a necessidade de expansão energética são a elevação do nível de independência energética e o ganho econômico em comparação com as soluções tradicionalmente empregadas. Outra vantagem é melhorar o nível da qualidade do fornecimento em situações onde o sistema de distribuição de energia é precário na qualidade do atendimento. Uma desvantagem é a elevação da complexidade de operação do sistema como um todo.

Referências Bibliográficas

- Boonbumroong, U. et al., 2011. Particle swarm optimization for AC-coupling stand alone hybrid power systems. *Solar Energy*, 85(3), p.560–569.
- Buran, B. et al., 2003. Environmental benefits of implementing alternative energy technologies in developing countries. *Applied Energy*, 76(1-3), p.89–100.
- Burden, R.L. & Faires, J.D., 2008. *Análise numérica* 8º ed, São Paulo: Cengage Learning.
- Dufo-López, R. & Bernal-Agustín, J.L., 2005. Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms. *Solar Energy*, 79(1), p.33–46.
- Karavas, C.-S. et al., 2015. A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration microgrids. *Energy Conversion and Management*, 103, p.166–179.
- Kyriakarakos, G. et al., 2013. Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids. *Applied Energy*, 103, p.39–51.
- Kyriakarakos, G. et al., 2011. Polygeneration microgrids: A viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel. *Applied Energy*, 88(12), p.4517–4526.
- Sinha, S. & Chandel, S.S., 2014. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32(0), p.192–205.
- Solar Energy Laboratory, U. of W.-M. et al., 2006. *Trnsys 16 Manual*, 1.