OMAR CHEIDDE CHAIM

ANÁLISE DE CUSTO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em sistemas de energia e automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado

São Carlos

2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C434a

Chaim, Omar Cheidde.
Análise de custo de fontes alternativas de energia. / Omar Cheidde Chaim ; orientador Ricardo Quadros Machado -- São Carlos, 2011.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Energia Eólica. 2. Pequena central hidrelétrica. 3. Energia solar fotovoltaica. 4. Custos de energia. 5. Fontes alternativas. 6. *Software HOMER*. I. Titulo.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Omar Cheidde Chaim

Título: "Análise de Custo de Fontes Alternativas de Energia"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 28/11/2011,

com NOTA 7,5 (sete, cinco), **pela comissão julgadora:**

Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada - EESC/USP

Prof. Dr. Azauri Albano de Oliveira Júnior - EESC/USP

Prof. Associado Homero Schiabel
Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica
EESC/USP

Sumário

Resumo i

Abstract ii

1. Introdução 1
2. Base teórica e entrada de variáveis 3

2.1. *"O software HOMER energy"* 3

2.1.1. Exemplo ilustrativo do HOMER energy 3

2.2 Geração térmoelétrica a gás 4

2.2.1. Entradas do software: Gás natural 5

2.2. Geração hidrelétrica 7

2.3.1. Entradas do software: hidrelétrica 8

2.4. Geração solar 10

2.4.1. Entradas do software: Fotovoltaica 12

2.5. Geração eólica 15

2.5.1. Entradas do software: Eólica 16

3. Obtenção de dados 19

3.1. Fontes primárias de energia 20

3.1.1. Energia Termoelétrica 20

3.1.2. Energia Hidroelétrica 22

3.1.3. Energia Solar Fotovoltaica 24

3.1.4. Energia Eólica 26

3.2. Dados econômicos 30

3.3. Elementos do sistema 31

3.3.1. Carga 31

3.3.2. Conversores e baterias 32

3.3.4. Rede elétrica 35

4. Simulação exemplo 36

4.1. Introdução 36

4.2. Dados de entrada 36

4.3. Esforço computacional 37

4.4. Resultados obtidos 38

4.4.1. Gráficos 38

4.4.2. Tabelas 45

4.4.3. Viabilidade Atual 48

4.5. Aplicação 48

5. Resultados 49

5.1. Análise Eólica 49
5.1.1. Sistema eólico gás 49
5.1.2. Sistema eólico rede 50
5.1.3. Viabilidade Atual 56
5.2. Análise Solar 56
5.2.1. Sistema solar gás 58
5.2.2. Viabilidade Atual 61
5.2.3. Sistema solar rede 61
5.2.4. Viabilidade Atual 63
5.3. Análise hidrelétrica 63
5.3.1. Viabilidade Atual 66
Conclusão 67
Bibliografia 69

Resumo

Com o aumento da demanda energética e a pressão ambiental contraria as fontes térmicas a combustível fóssil e nucleares, torna-se necessária a utilização de novas fontes de energia.

O principal intuito deste trabalho é analisar a viabilidade econômica de geração de energia eólica, fotovoltaica e de pequenas centrais hidrelétricas. A análise de viabilidade econômica considera custos estimados em valores reais e projeta tendências para verificar o efeito desses custos no ponto de ótimo de custo do sistema, além disso, independentemente do custo a entrada dessas fontes é forçada para verificar seu efeito no custo total da energia do sistema.

Palavras chave: Energia Eólica; Pequena central Hidrelétrica; Energia Solar Fotovoltaica; Custo de energia; Fontes alternativas; *software HOMER.*

Abstract

With increasing energy demand and environmental pressure against thermal sources fossil fuel and nuclear, it becomes necessary to use new sources of energy.

The main purpose of this research is to analyze the economic feasibility of wind power generation, photovoltaic and small hydro. The economic feasibility analysis considers costs estimated in real projects and trends to verify the effect of these costs at the point of optimum system cost, moreover, regardless of the entry cost, these sources will be forced in to check its effect on the overall energy cost the system.

Key words: Wind power; Small hydro; photovoltaic generation; Energy cost; alternative sources; HOMER software;

1. Introdução

Desde o inicio da produção de energia elétrica e de bens que a utilizassem, o potencial instalado de energia vem crescendo vigorosamente. Atualmente a dificuldade está em encontrar recursos disponíveis para explorar tendo em vista, que o abundante potencial hidrelétrico disponível já foi bastante explorado no Brasil, diversos recursos minerais sofrem especulações sobre sua possível extinção, preços de combustíveis utilizados em larga escala disparam devido ao aumento da demanda e até a temperatura do planeta se eleva devido ao uso em larga escala de energia de combustível fóssil. Neste cenário de esgotamento de recursos naturais é necessário recorrer a novas fontes de geração de energia.

O crescimento econômico está intrinsecamente ligado à disponibilidade energética. Uma diminuição no consumo de energia está diretamente relacionada a um decréscimo no produto interno bruto (PIB), sendo necessário, portanto, aumentar a disponibilidade de energia antes de pleitear um crescimento econômico.

Por outro lado pressões ambientais e sociais geram um esforço político para a geração de energia renovável, que se torna visível na forma de incentivos fiscais linhas de financiamentos e até preços distintos de compra de energia. O problema está no custo final da energia, países desenvolvidos muitas vezes cobram taxas das unidades mais poluidoras para financiar os incentivos às energias alternativas, isto leva, invariavelmente, a um aumento no custo total da energia. Esse encarecimento da energia aumenta os custos de produção, o que leva a uma diminuição de competitividade frente aos produzidos com energia mais barata.

Inicialmente proibitivos, os custos de geração das energias alternativas tiveram uma redução drástica nas últimas décadas. A procura por novas formas de suprir as demandas energéticas da vida moderna incentivou pesquisas e projetos de exploração de formas de diversos tipos de geração, da queima de bagaço de cana até o aproveitamento da energia de colisão de fótons (FARRET; SIMOES, 2006, p.130). A viabilidade de um sistema elétrico, porém, depende de dois fatores, da capacidade de suprimento à carga e do custo final do fornecimento dessa energia. Nesse trabalho serão analisadas estas características para três formas de geração, a solar fotovoltaica, a energia de pequenas centrais hidrelétricas e a energia eólica.

O objetivo destas simulações é estimar o custo atual de geração dessas formas conforme sua partição cresce na matriz energética e verificar a influência de fatores com tendências de variação na formação destes custos.

Para a realização das análises é utilizado o software "*HOMER Energy*", desenvolvido pelo National Renewables Energy Laboratory (NREL), é próprio para estudos de geração e custos de sistemas de alimentação híbrida. Esse software foi escolhido por indicação do orientador deste

trabalho, tendo um capítulo dedicado no livro *"Integration of Alternative sources of energy"* (FARRET; SIMOES, 2006, p.*379-419).*

No capitulo 2 estão contidas a base teórica e as variáveis de entrada. Cada variável a ser trabalhada na demonstração é descrita em sua importância e utilização e especificidades, sendo especificadas quais serão ou não utilizadas. A base teórica trata de especificidades de cada forma de geração tratando de suas características de produção de energia, aproveitamento de potencial e instalação. Também é nesse capitulo descrito o funcionamento do software.

O capitulo 3 descreve o procedimento de obtenção dos dados para alimentar o *"HOMER".* São explicitadas as fontes e feitas as devidas considerações sobre os valores obtidos, sua variabilidade e dispersão.

Uma simulação exemplo é descrita em detalhes no capitulo 4, sendo explicados os gráficos de saídas do software com maior nível de detalhamento. Essa simulação é uma das utilizadas para realização das análises, especificamente a análise eólica-gás natural.

Os resultados presentes no capitulo 5 tratam de uma forma menos detalhada os resultados das outras simulações realizadas e a análise de viabilidade atual.

Os capitulos 6, 7 e 8 são respectivamente conclusão, referencias bibliográficas e bibliografia consultada.

2 . Base teórica e variáveis de entrada

O objetivo desse capitulo é fornecer informações básicas dos componentes dos sistemas analisados e sua modelagem computacional. São descritas as variáveis de entrada do *software "HOMER energy"* (utilizado para as simulações) e as características principais das fontes estudadas.

Toda geração de energia elétrica é na verdade uma conversão, assim, diferentes formas de energia podem ser convertidas em elétrica. Nesse trabalho serão analisados apenas quatro tipos: termelétrica a gás, pequena central hidrelétrica, energia solar fotovoltaica e energia eólica.

2.1. O *software HOMER energy*

O *software* utilizado, "*HOMER energy"* (*"HOMER"*), é um modelo computacional desenvolvido pelo *U.S. National Renewable Energy Laboratory* (NREL) para auxiliar na análise e comparação entre diferentes formas de energia de sistemas de potência de pequena escala. O *software* trabalha em três níveis (sensibilidade, otimização e simulação) para fornecer informações referentes a custos e características técnicas de geração de um sistema.

Para cada possibilidade combinatória de variáveis e sensibilidades analisadas existe uma simulação, e para cada possibilidade combinatória das sensibilidades existe um ponto ótimo.

O nível de sensibilidade é responsável pela análise geral do custo ótimo do sistema para diferentes condições de operação definidas pelas variáveis de sensibilidade. São fornecidos diversos gráficos nesse nível, mostrando o comportamento do sistema na área delimitada por esses valores.

O nível de otimização mostra a simulação com o custo mais baixo dentro de uma característica fixa de sensibilidade, nesse nível obtêm-se mais detalhes quanto ao ponto de operação ótimo, como, por exemplo, o custo de capital de cada forma de geração, a quantidade de energia elétrica produzida e o percentual de energia renovável. Este nível de detalhamento pode ser visto em cada simulação.

Para cada elemento do sistema existe uma ou mais telas de entrada de variáveis para a modelagem, neste capítulo serão descritas apenas as relacionadas às fontes. A forma de obtenção dos dados de entrada e os dados gerais utilizados serão descritos no capitulo 3, enquanto os valores específicos de cada iteração serão descritos no capitulo 5. A utilização do *software*, gráficos e tabelas de saída estão detalhados na simulação exemplo do capitulo 4.

2.1.1 Exemplo ilustrativo do *HOMER energy*

Tomando por exemplo o seguinte sistema: limite de falta de energia de 1%; gerador a gás de 1 kW; carga de 5 kW; compra de energia da rede ilimitada.

O software inicialmente calcula a saída de energia do gerador para diferentes quantidades de queima de combustível e verifica qual a mais barata. Uma vez que o gerador foi estatizado em 1 kW, certamente estará no sistema e o software apenas calcula a alternativa mais barata para operação (controle de combustível). Este é o caso de uma simulação simples, onde todas as variáveis referentes às instalações e custos estão travadas, o software simplesmente opera o sistema para minimizar custos dentro dos limites preestabelecidos.

Pode-se incrementar a análise adicionando mais uma possibilidade, a de não haver geração a gás. Neste caso o software repete o procedimento anterior de minimização de custo e posteriormente recalcula completamente o sistema levando em conta a nova possibilidade. São então apresentadas duas simulações, uma com energia a gás e outra apenas com ligação a rede. Obter-se-ia um ponto de ótimo, que pode ser do tipo gás-rede ou apenas rede.

Ainda é possível adicionar uma segunda fonte, digamos uma hidrelétrica, considera-se a potência de saída de 1 kW (nominal) ou sem a hidrelétrica. Neste caso teríamos todos os cálculos feitos quatro vezes, uma para cada possibilidade: sem gás nem hidrelétrica, 1 kW de gás e sem hidrelétrica, 1 kW de hidrelétrica e sem gás e ambas as formas de geração em 1 kW. Novamente seria encontrado um ponto ótimo, podendo ser agora de quatro tipos, hidrelétrico-gás-rede, gás-rede, hidrelétrico-rede e rede.

Finalmente é ainda possível variar quaisquer custos. Adicionando a possibilidade do gás natural estar caro ou barato, teremos então dois pontos de ótimo e não um. Todas as simulações do paragrafo anterior seriam calculadas novamente para dois valores, uma otimização completa para o gás barato e outra para o gás caro. Esta é uma análise de sensibilidade simples, pois contém apenas uma variável.

Poder-se-ia ainda adicionar mais uma possibilidade de variação, o custo da instalação da hidrelétrica, por exemplo. Seriam então quatro ótimos, gás e hidrelétrica baratos, ambos com custo elevado, e as duas combinações onde apenas um dos custos é elevado. Este é o caso mais completo, onde existe um plano de pontos ótimos. Caso adicionem-se novas variáveis de sensibilidade, apenas duas seriam representadas por vez, sendo a terceira afixada em um valor. No entanto pode-se escolher quais duas serão os eixos do plano e em qual valor as outras variáveis serão afixadas.

2.2. Geração térmica a gás

Os geradores a combustível funcionam através da conversão da energia de ligações químicas em elétrica e calor. Os pequenos geradores operam com menor eficiência de forma parecida com o que ocorre nos motores de automóveis convencionais, a diferença é o direcionamento da energia para o eixo de um gerador elétrico e não para as rodas. Os geradores maiores possuem um princípio diferente: o calor gerado pela queima de combustível aquece a água numa tubulação que, transformada em vapor, ganha velocidade e move uma turbina.

Existem muitas outras topologias de conversão desta energia química em elétrica. No caso de geradores à combustão há sempre a transformação de energia química em calor e posteriormente em elétrica. Esta conversão contínua de formas de energia faz com que a eficiência seja menor, sendo que apenas usinas a gás com ciclo combinado conseguem alcançar uma eficiência superior a 45% (FARRET; SIMOES, 2006, p.18).

Uma unidade geradora movida a diesel ou a biodiesel pode possuir exatamente o mesmo princípio de funcionamento, às vezes até a mesma estrutura mecânica e características de geração, com a diferença de que a primeira utiliza-se de um combustível fóssil não-renovável, enquanto a segunda é plenamente renovável.

Para os estudos realizados neste trabalho são utilizadas unidades geradoras a gás por dois motivos: por ser a fonte de energia fóssil em maior expansão atualmente e por ter a melhor resposta à flutuação de carga entre as fontes térmicas.

2.2.1. Entradas do *software*: Gás natural

A modelagem realizada pelo *software* possui duas telas principais de entrada de dados, uma referente ao gerador e outra referente aos dados do combustível utilizado.

A *figura 1* mostra a tela de entrada das características do gerador.

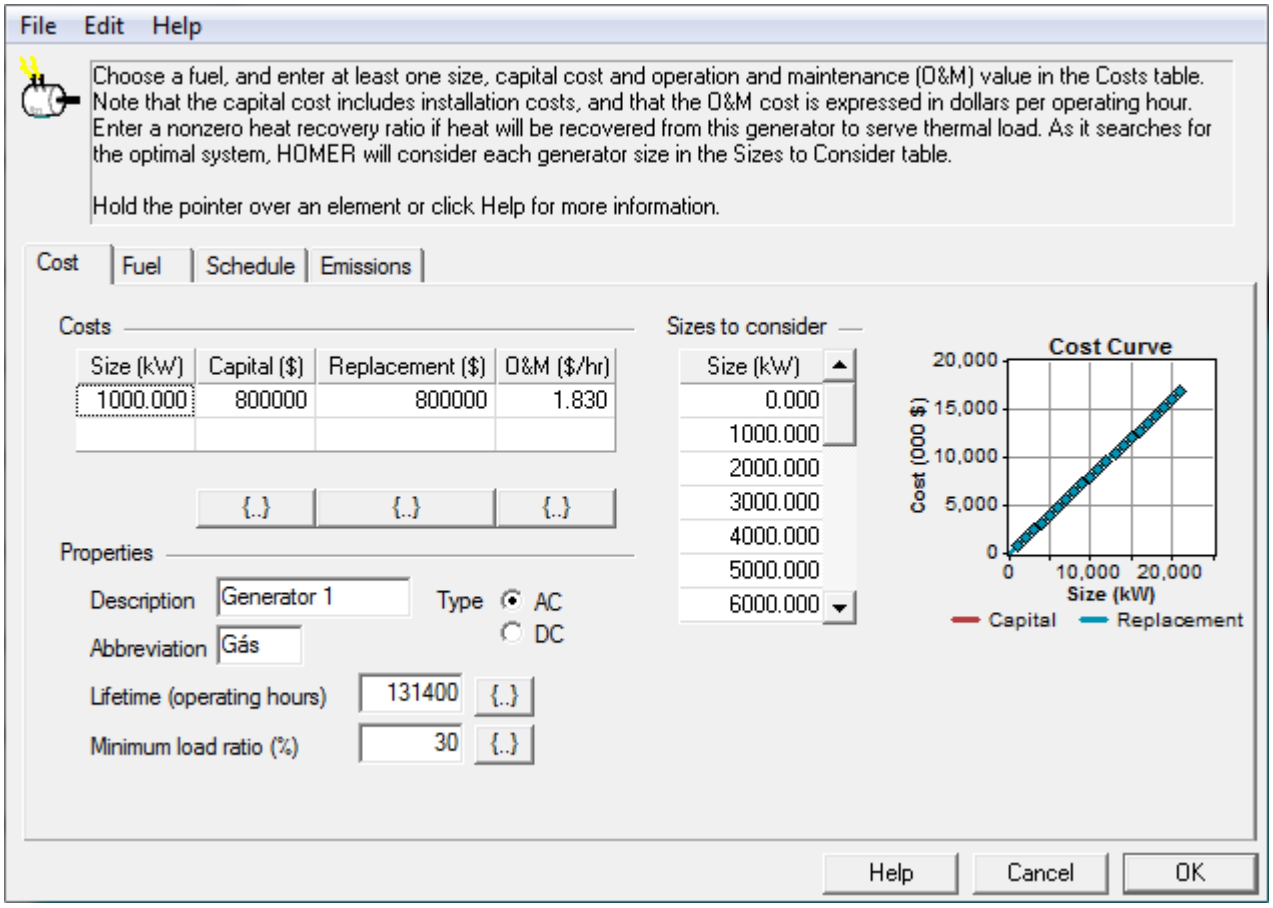


Figura 1: Tela de entrada de fatores de custo do gerador a gás.

Segue a descrição da tela referente à *figura 1*:

- Size: potência inicial da unidade
- Capital: custo de instalação da unidade de potência estabelecida em “size”
- Description: Uma descrição utilizada para visualização do componente no sistema.
- Abbreviation: O nome a ser impresso nos gráficos de sensibilidade.
- Lifetime (operating hours): O tempo de vida útil em horas.
- Minimum load ratio (%): O menor valor de carga onde o gerador pode operar.
- Type: Define se o gerador tem saída em corrente continua ou alternada.

Na aba “Fuel” estão contidas as informações referentes à eficiência do combustível e eficiência do gerador. A *figura 2* mostra a tela de edição destas variáveis. O sistema não foi modelado com recuperação de energia de calor e os outros dois coeficientes foram regulados exclusivamente para a criação da curva de eficiência do gerador.

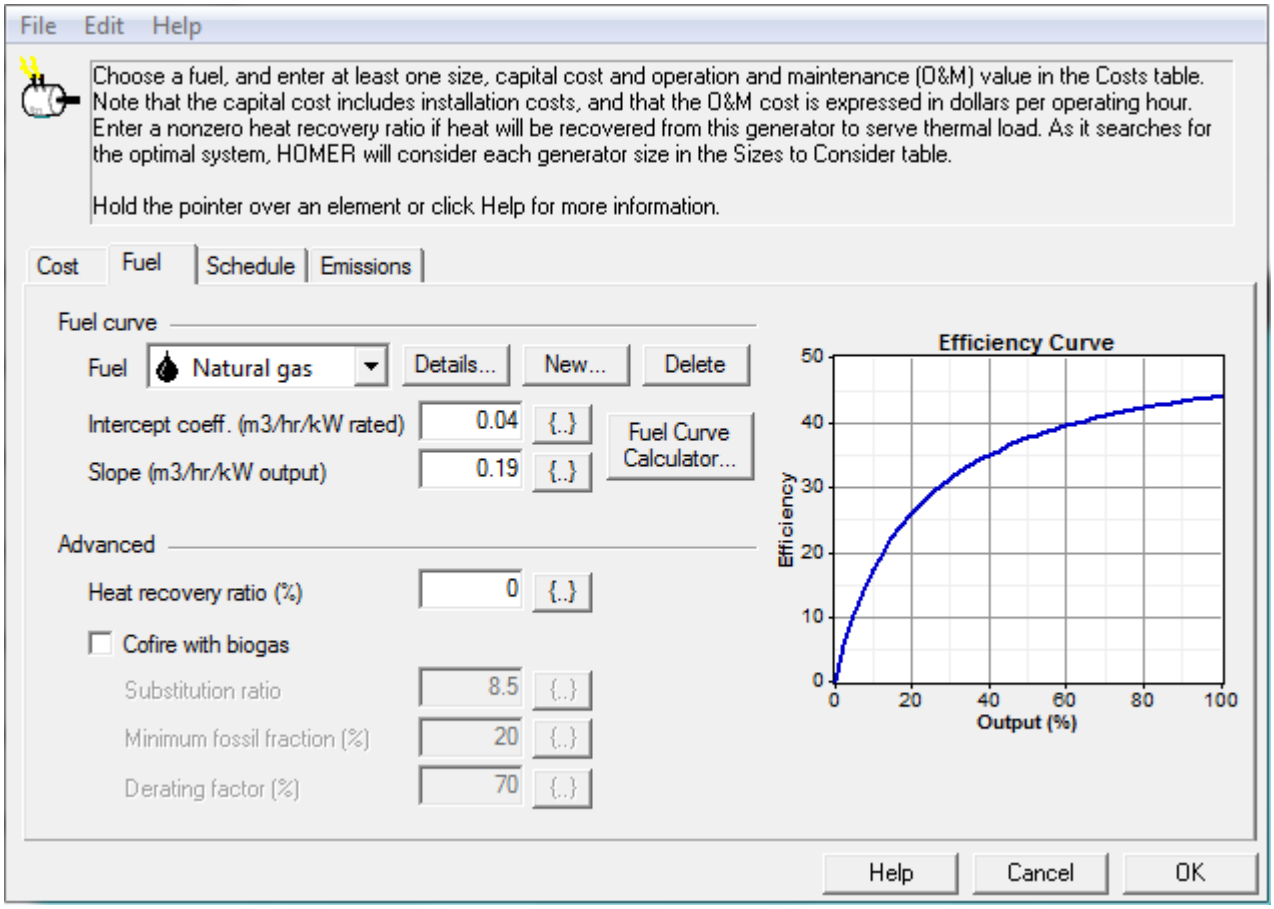


Figura 2: Tela de entrada de variáveis de eficiência e combustível do gerador a gás natural.

Segue a descrição da tela referente à *figura 2*:

- Intercept coeff. (m3/hr/kW rated): Gasto de combustível do gerador em vazio.
- Slope (m3/hr/kW output): O consumo marginal de combustível do gerador.

As variáveis *Slope e Intercept coeff*. foram modeladas para a obtenção de limites de eficiência típicos de geradores a gás (FARRET; SIMOES, 2006, p18). As variáveis de reaproveitamento térmico não foram utilizadas.

As abas referentes à *Schedule* (agenda) e *Emissions*, ambas das *figuras 1 e 2*, não foram utilizadas, pois sua análise não está no escopo desse trabalho. *Schedule* trava o funcionamento do gerador segundo uma agenda pré-determinada e *Emissions* altera as características de emissão da unidade.

A figura 3 mostra a tela de entrada de variáveis do combustível utilizado pelo gerador, no caso gás natural. É uma variável normalmente utilizada como sensibilidade.

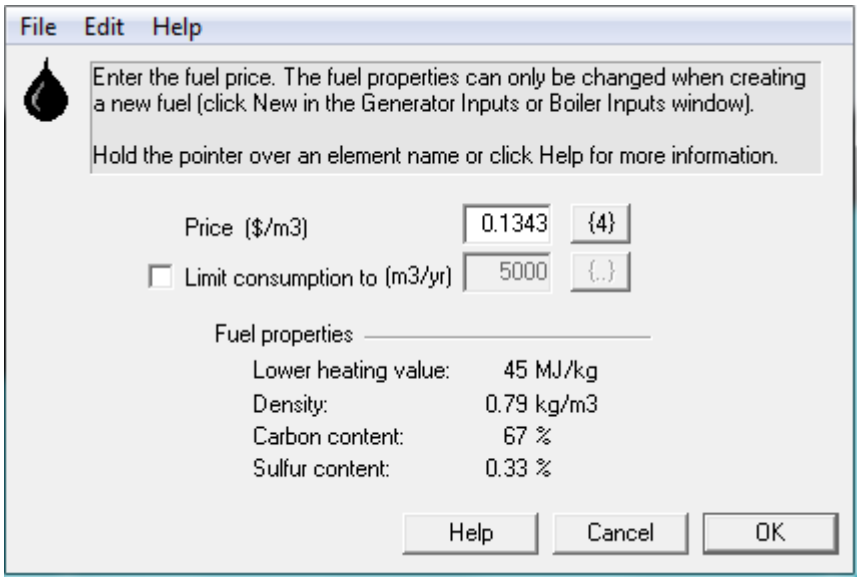


Figura 3- Tela de entrada de variáveis referente ao gás natural

Segue a descrição da tela referente à *figura 3*:

- Price ($/m3) : O preço do gás por metro cúbico
- Limit consuption to (m3/yr): Limite de gás disponível para o sistema
- Fuel properties: São as características do combustível, caso queira analisar um novo combustível é possível redefina-las - Estes valores são do modelo do software.

2.3. Geração hidrelétrica

A energia hidrelétrica é a forma de aproveitamento elétrico de fonte renovável mais antiga, madura e bem estabelecida, nessa forma de geração a energia cinética das águas é utilizada para mover uma turbina acoplada a um gerador. A energia pode ser aproveitada com ou sem reservatório e é dada pela equação 1:

(1) $P_t = \eta_t * \rho * g * Q * H_m$

Onde P_t é a potência elétrica de saída, η_t é a eficiência de conversão, ρ é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade, Q a vazão em m³/s e H_m é a altura de queda disponível.

O maior problema de utilização desta forma de geração é sua disponibilidade limitada. Apesar de possuir um grande impacto ambiental no momento de sua instalação, seu impacto em operação é quase nulo. Devido a suas excelentes características de custo, resposta rápida à flutuação de carga (especialmente para usinas com reservatório) e reduzido impacto ambiental após a instalação, esta forma de geração teve seu potencial praticamente esgotado nas regiões desenvolvidas do mundo. As regiões onde ainda existe potencial inexplorado são normalmente distantes de centros de consumo ou o tem esse aproveitamento barrado por motivos ambientais ou construtivos.
Caso não existam condições especiais, normalmente, se há potencial hidrelétrico disponível, este será utilizado antes dos demais.

2.3.1 Entradas do *software*: Hidrelétrica

A energia hidrelétrica é tratada diferentemente pelo *software HOMER*. Ao contrário das outras fontes modeladas por potência instalada, a energia hidrelétrica é modelada para uma vazão nominal em determinada altura de queda, o que ilustra a característica de potencial limitado típica dessa geração, uma vez que a análise é centrada na disponibilidade do recurso.
As *figuras 4 e 5* mostram as duas telas de entrada de variáveis para as centrais hidrelétricas, respectivamente referentes ao rio onde será instalada e à turbina a ser instalada.

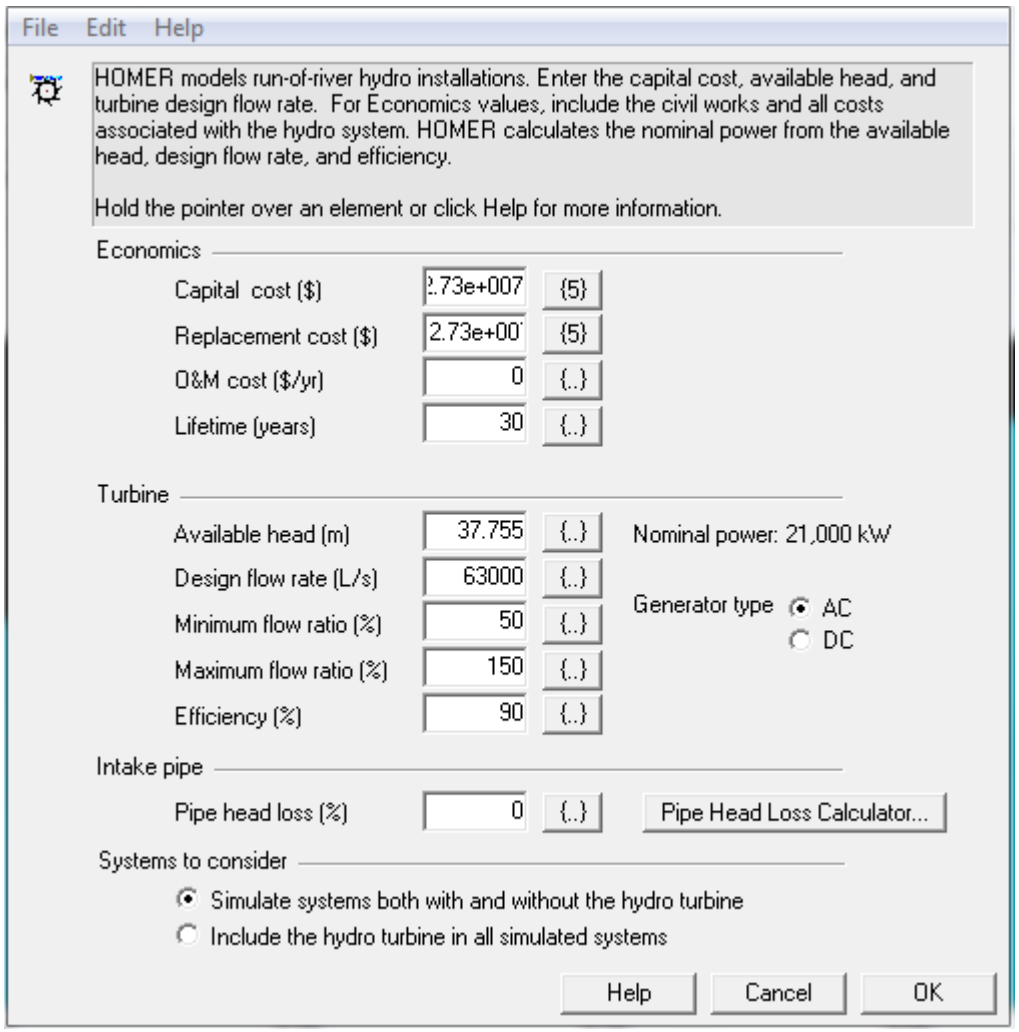


Figura 4 – Tela de entrada referente ao gerador hidrelétrico

Segue a descrição da tela referente à *figura 4*:

- Capital cost ($): Custo total de instalação da unidade geradora
- Replacement cost ($): Custo de substituição de peças referente ao término da vida útil.
- O&M ($/ano): Custo total de manutenção e operação. O padrão para unidades hidrelétricas é zero.
- Lifetime (anos): Tempo de operação até a necessidade de substituição.
- Available head (m): Altura de queda disponível (considerada característica de projeto do gerador pelo software).
- Design flow rate (m^3/s): Vazão nominal da turbina.
- Minimum flow rate (m^3/s): Vazão mínima para entrada em operação.
- Maximum flow rate (m^3/s): Vazão máxima permitida antes do desligamento.
- Efficiency (%): Eficiência total do conjunto turbina-gerador.
- Pipe head loss (%): Perda de atrito na tubulação expressa como uma porcentagem da altura de queda.

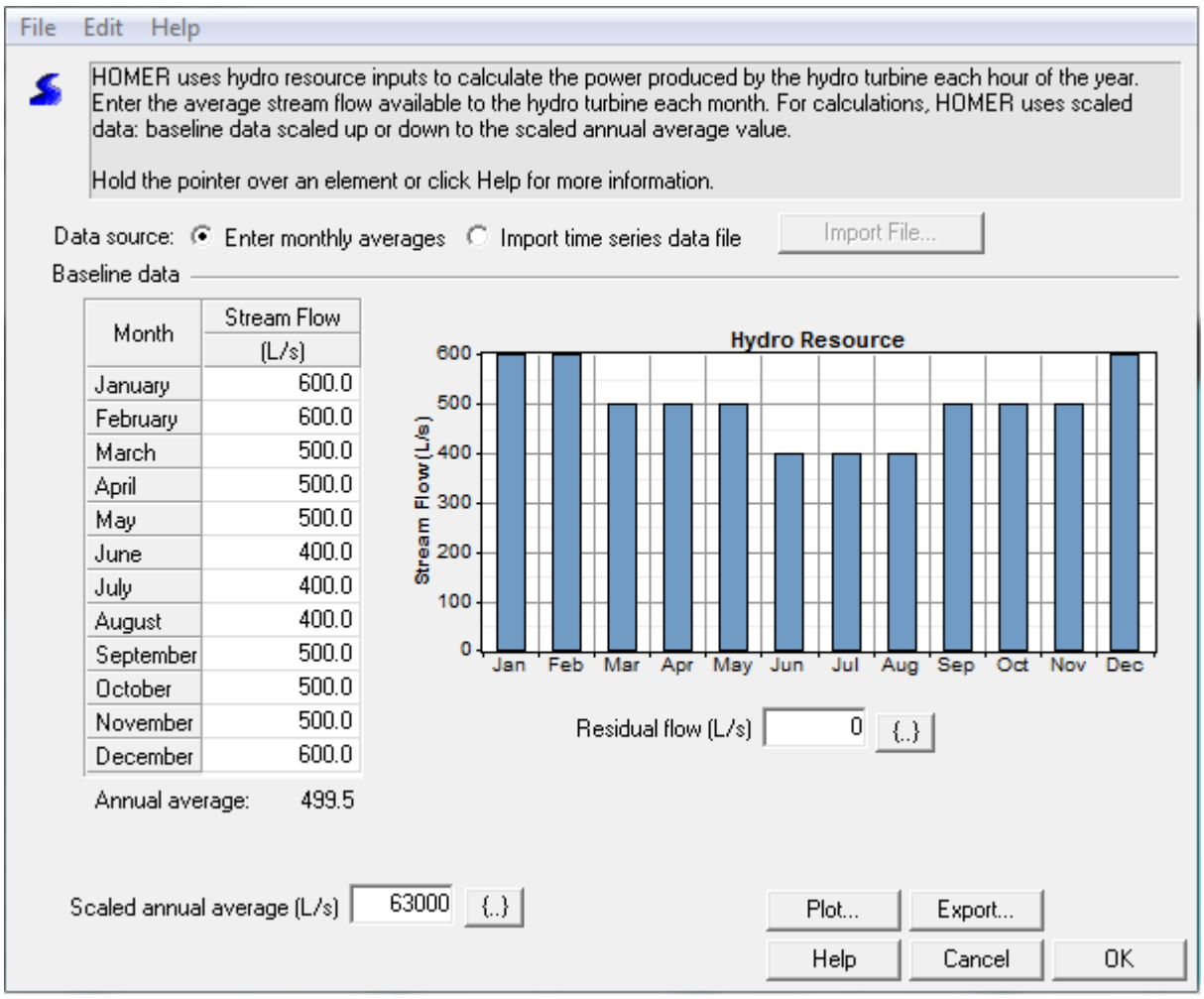


Figura 5 – Característica do rio utilizado para geração.

Segue a descrição da tela referente à *figura 5*:

- Month/Stream flow: Vazão média mensal
- Scaled annual average: Média anual escalonada.

Para realizar teste de sensibilidade utilizando as vazões, usa-se a média anual escalonada. Essa variável recria a forma da curva descrita pelas médias mensais, mas altera o módulo, para que a média anual se torne o valor alocado na média anual escalonada.

2.4. Geração solar

A fonte de energia primária para os recursos energéticos hidráulicos, eólicos e de biocombustíveis (devido à fotossíntese) é a solar. Cada vez que existe uma conversão energética parte da energia inicial é dispersa, causando uma diminuição no total remanescente, o que faz com que, a energia solar possua o maior potencial de geração (por ser a fonte primária da qual as outras derivam). Com uma pequena parcela da energia solar irradiada para o deserto do Saara seria possível alimentar todas as cargas do mundo. O entrave é o custo.

Atualmente existem duas formas de maior destaque para aproveitamento direto de radiação solar, as térmicas e as fotovoltaicas. O sistema solar térmico é indicado para baixas latitudes (FARRET; SIMOES, 2006, p112), inferiores a 30 graus, e é utilizado principalmente para aquecimento direto. Embora uma das aplicações deste método seja em centrais geradoras com concentradores e sistemas de tubulação para transformar o calor da irradiação em energia elétrica, esta geração possui maior eficiência se aplicada diretamente em cargas térmicas, evitando assim o uso de energia elétrica para a mesma função. Essas centrais geradoras utilizam uma área de superfície menor do que as fotovoltaicas para a geração de energia, mas não são viáveis para gerar eletricidade em pequenas instalações.

A energia fotovoltaica, por sua vez, converte diretamente a luminosidade solar em energia elétrica através do efeito fotoelétrico.

As placas fotovoltaicas funcionam como os terminais de carga de uma bateria quando existe uma incidência suficiente de fótons. Os elétrons da camada de valência saltam ao serem excitados pelos fótons, resultando em uma diferença de potencial na estrutura cristalina do semicondutor entre a camada externa repleta de carga negativa (elétrons) e o limite inferior do “gap” (buraco, espaço entre dois níveis) de energia, de onde provêm os elétrons, que fica positivamente carregado. Se houver uma ligação entre as duas regiões, haverá corrente, ou seja, energia elétrica.

Apesar de ser uma conversão direta, existe grande perda de energia no processo. Mesmo as melhores placas fotovoltaicas têm eficiência inferior a 30%. Aspectos construtivos das placas e características físicas dos materiais não permitem ainda eficiência maior, teoricamente limitada a 33,7% para placas de silício (SHOCKLEY; QUEISSER, 1961).

Ao considerar o potencial solar disponível na superfície do planeta, uma eficiência de 30% é centenas de vezes mais do que o suficiente. A quantidade de energia lançada na atmosfera pelo sol é suficiente para suprir milhares de vezes toda à energia utilizada no planeta, podendo então ser considerada completamente renovável e, para todos os propósitos tecnologicamente acessíveis na atualidade, ilimitada. A *figura 6*[1] mostra a área da superfície mundial necessária para suprir toda a demanda de energia mundial em 2005, incluindo energias não elétricas.

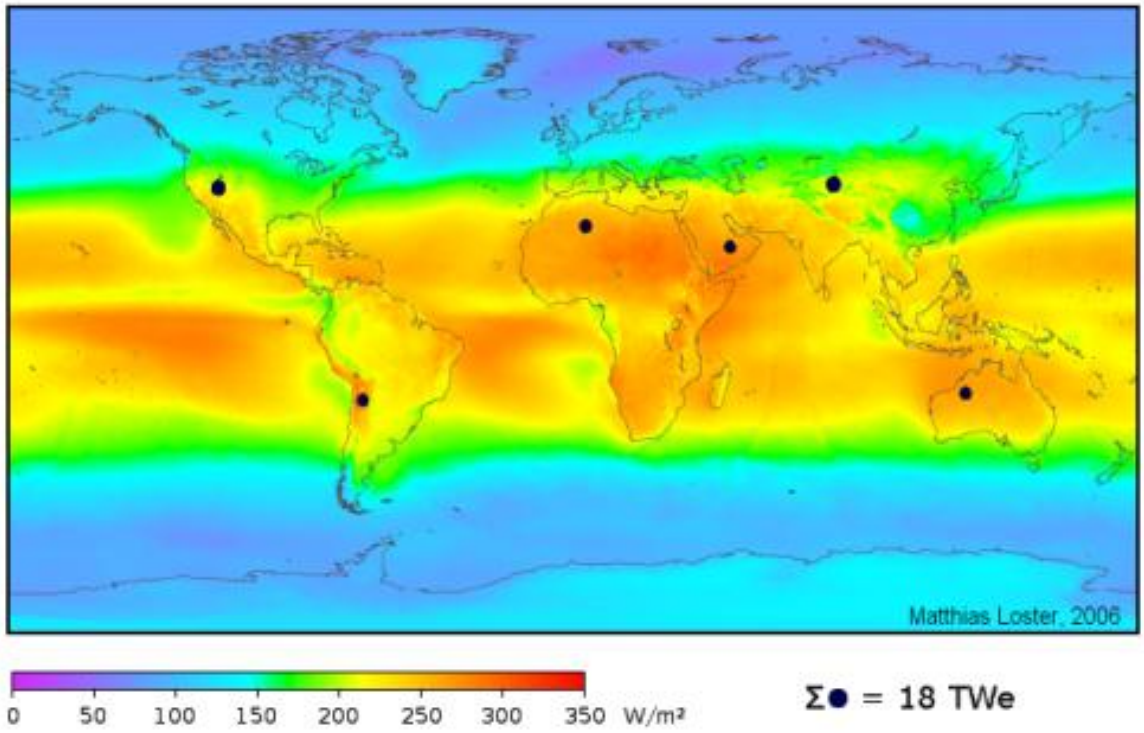


Figura 6- Área necessária para substituir a energia utilizada mundialmente por energia solar.

A questão da utilização desta energia não está em sua disponibilidade, mas sim em sua viabilidade. Após a produção das placas fotovoltaicas, o impacto causado pela geração é mínimo, mas durante a produção é relevante. Além da quantidade de energia necessária para a criação das placas (fornecida atualmente por fontes possivelmente poluentes) o processo de fabricação das placas mais utilizadas faz uso de componentes químicos nocivos, além do problema de descarte das placas após sua vida útil.

2.4.1 Entradas do *software*: Fotovoltaica

A *figura 7* mostra a tela de entrada de variáveis dos painéis solares fotovoltaicos.

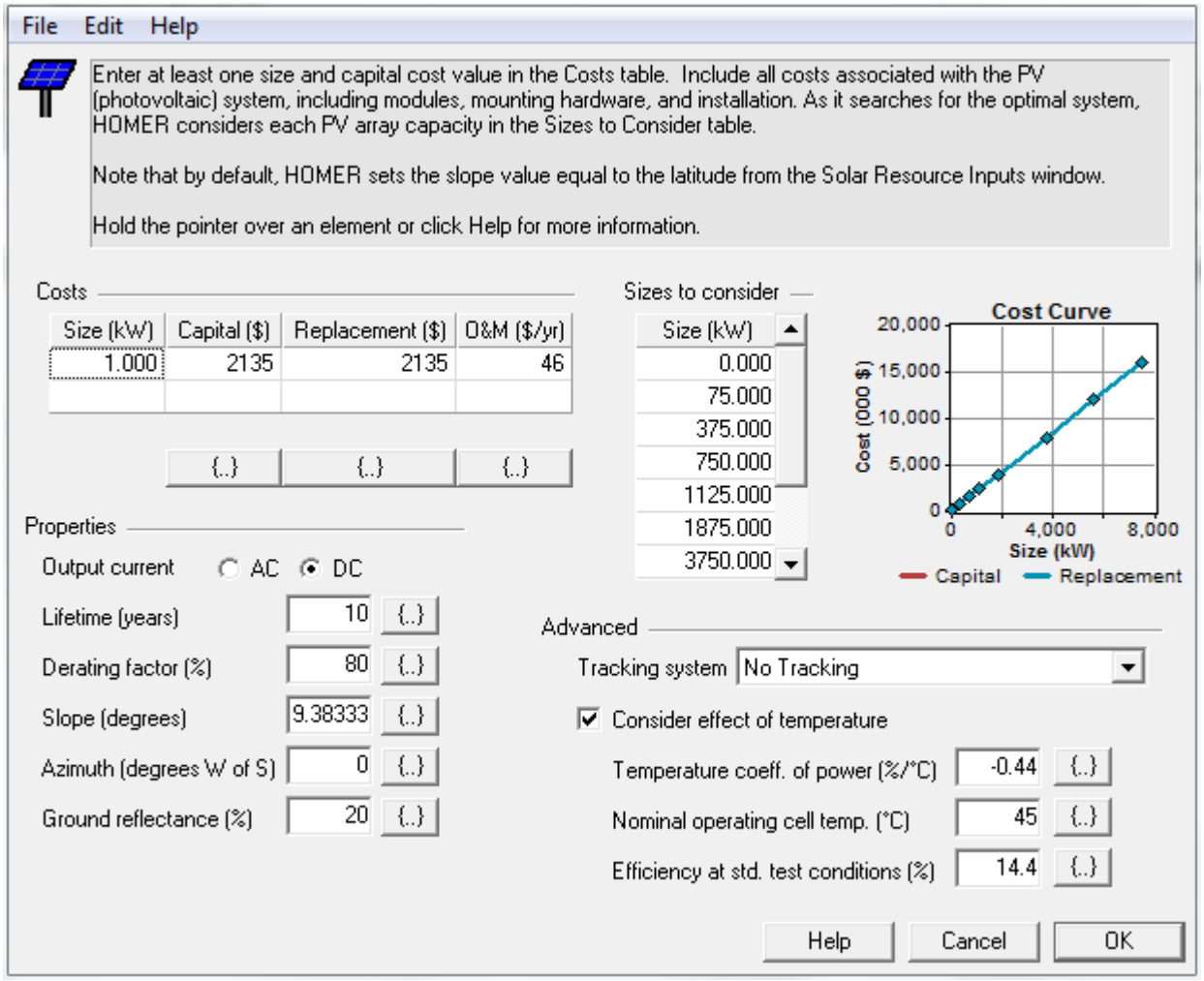


Figura 7 – Tela de entrada de características referente às células fotovoltaicas

Segue a descrição da tela referente à *figura 7*:

- Size (kW): Potência da unidade para qual o capital, custo de substituição e custo de operação estão descritos.
- Capital ($): Custo de total de instalação da potência denominada.
- Replacement ($): Custo de substituição após o vencimento da vida útil.
- O&M($): Custo anual de operação e manutenção.
- Output current ($/ano): Define se a geração é em corrente contínua ou alternada.
- Lifetime (anos): Tempo de vida útil esperado em anos.
- Derating factor (%): Fator total de perdas devido à temperatura, sujeira e outros (dado pelo fabricante).
- Slope (graus): Inclinação das placas com relação a linha horizontal. Depende da latitude.
- Azimuth (graus): Fator que indica a direção para quais os painéis estão direcionados. 180 para Norte, 0 para Sul.
- Ground reflectance (%): Porcentagem da energia solar refletida pelo solo.

- Temperature coeff. of Power: Fator de correção de potencia de saída devido a temperatura.
- Nominal operating cell temp (graus Célsius): Temperatura nominal de operação da célula fotovoltaica.
- Efficiency at std. test conditions(%): Eficiência nas condições padrões de teste

Para completar o quadro de geração fotovoltaica é ainda necessária a modelagem da irradiação solar na localidade de instalação do sistema, conforme consta na *figura 8*.

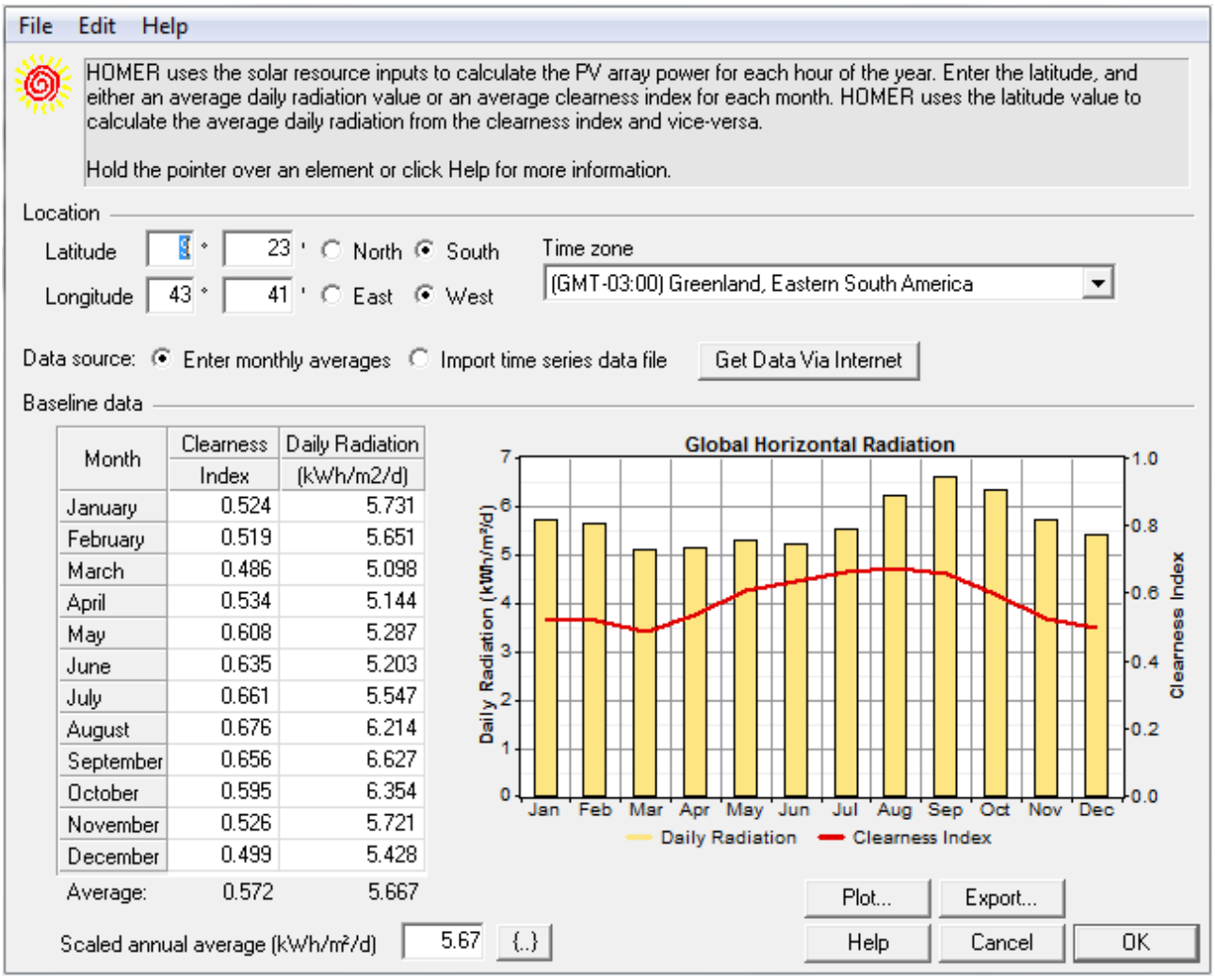


Figura 8 – Tela de entrada das características da irradiação solar.

Segue a descrição da tela referente à *figura 8*:

- Latitude/Longitude: São as coordenadas da localidade onde o sistema será instalado. São utilizadas pelo software para obter automaticamente as informações referentes à irradiação solar.
- Month/ Clearness Index: Índice de passagem de radiação até a superfície. Quanto maior o índice maior a parcela de energia que atinge nível do solo (o índice varia de 0 a 1).

- Month/ Daily radiation: Potência solar média, em cada mês, que chega ao solo no período de um dia.
- Scaled annual average: Média anual escalonada.

A média anual escalonada funciona da mesma forma que para a hidrelétrica, porém é escalonada à potência de incidência solar, e não a vazão.

2.5 Geração Eólica

Uma turbina eólica é um dispositivo de conversão de energia cinética dos ventos em energia mecânica. Através de um gerador acoplado ao eixo de rotação essa energia é posteriormente convertida em energia elétrica. Para produção de energia elétrica em escala, também se faz necessária a adição de uma caixa de transmissão para intermediar a transformação de energia mecânica em elétrica, isso é necessário, pois as baixas velocidades de rotação da turbina não são apropriadas para a conversão de energia no gerador (isso se deve a características construtivas e de eficiência do conversor). As turbinas industriais modernas possuem um anemômetro acoplado para discernir a direção do vento, informação que é enviada a um computador que, através da ação de um motor acoplado a cabeça da turbina, redireciona a parte superior do gerador para o ponto de operação ótimo.
A quantidade de energia absorvida pelas pás pode ser aproximada pela equação 2 (FARRET; SIMOES, 2006, p 87):

$$(2) \qquad P_m = \frac{\rho A v_1^3 C_p}{2}$$

Onde P_m é a potência gerada, ρ é a densidade do ar, A é a área de varredura das pás, v é a velocidade do vento e C_p é a constante de conversão de energia. A constante C_p depende de características físicas de conversão do sistema (normalmente variando de 35% a 50%).
O físico Alemão Albert Betz majorou em 1919 a eficiência real de uma turbina eólica em 59%[2]. Vale notar que esta constante é diferente para cada velocidade.
A equação não é utilizada nas análises, pois atualmente os fabricantes de turbinas fornecem curvas empíricas de potência em função da velocidade do vento.
Com relação aos custos de geração, a energia eólica possui características diferentes das formas de geração convencionais, por possuir um alto custo de instalação e menor de operação e manutenção, ou seja, tem característica de custo mais próxima da geração hidrelétrica do que das térmicas.
Esse custo de instalação é elevado devido a diversos fatores, dentre eles os principais são: o valor da turbina, custos de montagem e transporte, custos de transmissão de energia e custo dos

conversores. Uma vez instalada a central deve gerar energia elétrica com um custo estimado de operação e manutenção anual inferior a 10% de seu custo de instalação por ano. Esses custos são devidos a, principalmente, custos operacionais e de manutenção. Atualmente o tempo de vida útil de uma unidade é próximo de vinte anos (FARRET; SIMOES, 2006, p 18).

Como não possui capacidade de gerar constantemente na frequência nominal, devido a características construtivas, faz-se necessário uma conversão para o acoplamento na rede de energia elétrica. Turbinas de potência elevada são vendidas comumente com conversor acoplado, sendo, portanto de ligação imediata na rede elétrica. Vale ressaltar que o fato de terem o conversor acoplado faz com que estas turbinas sejam adequadas a geração apenas em uma frequência (cinquenta ou sessenta Hertz).

Atualmente esta é a forma de energia renovável não convencional mais competitiva e eficiente disponível em escala.

2.5.1 Entradas do *software*: Eólica

A *figura 9* mostra a tela de variáveis de entrada referentes à geração eólica.

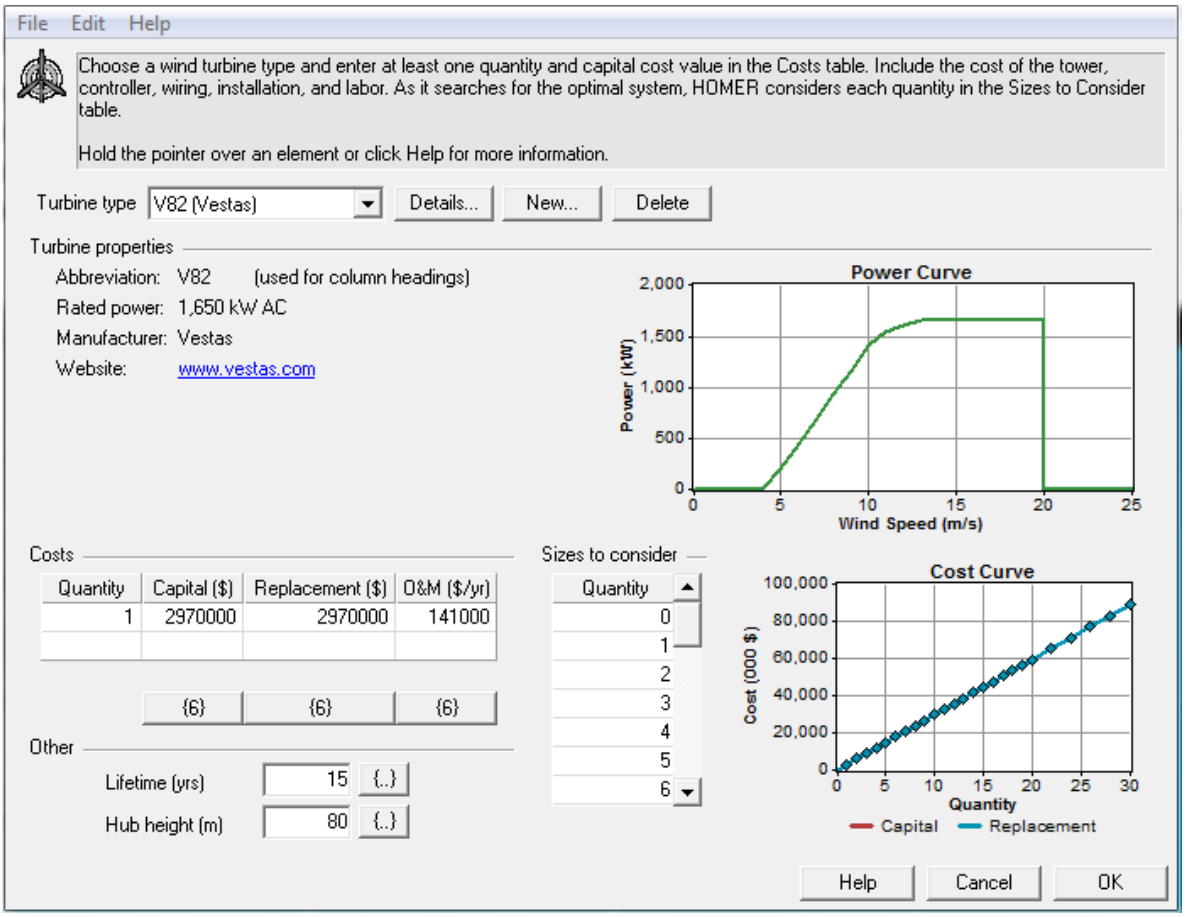


Figura 9 – Tela de entrada de variáveis para a turbina eólica.

Segue a descrição da tela referente à *figura 9*:

- Turbine Type: Seleção da turbina. O software contém informações do fabricante referente a curvas de potência, velocidade máxima e mínima de ventos para geração e outras características técnicas.
- Quantity: No quadro, numero de turbinas a que são referidos os custos. Na coluna sizes to consider, o número de turbinas que podem ser utilizadas nas simulações para obter o ótimo do sistema.
- Capital: Custo total da unidade geradora instalada.
- Replacement : Custo de reposição após vencimento do tempo de vida útil.
- O&M: Custo anual de manutenção e operação da unidade.
- Lifetime: Vida útil esperada para a unidade geradora.
- Hub height: Altura do centro do rotor da unidade geradora da unidade geradora ao solo.

O *software* utiliza a tela da *figura 10* para modelar as características dos ventos no local de instalação.

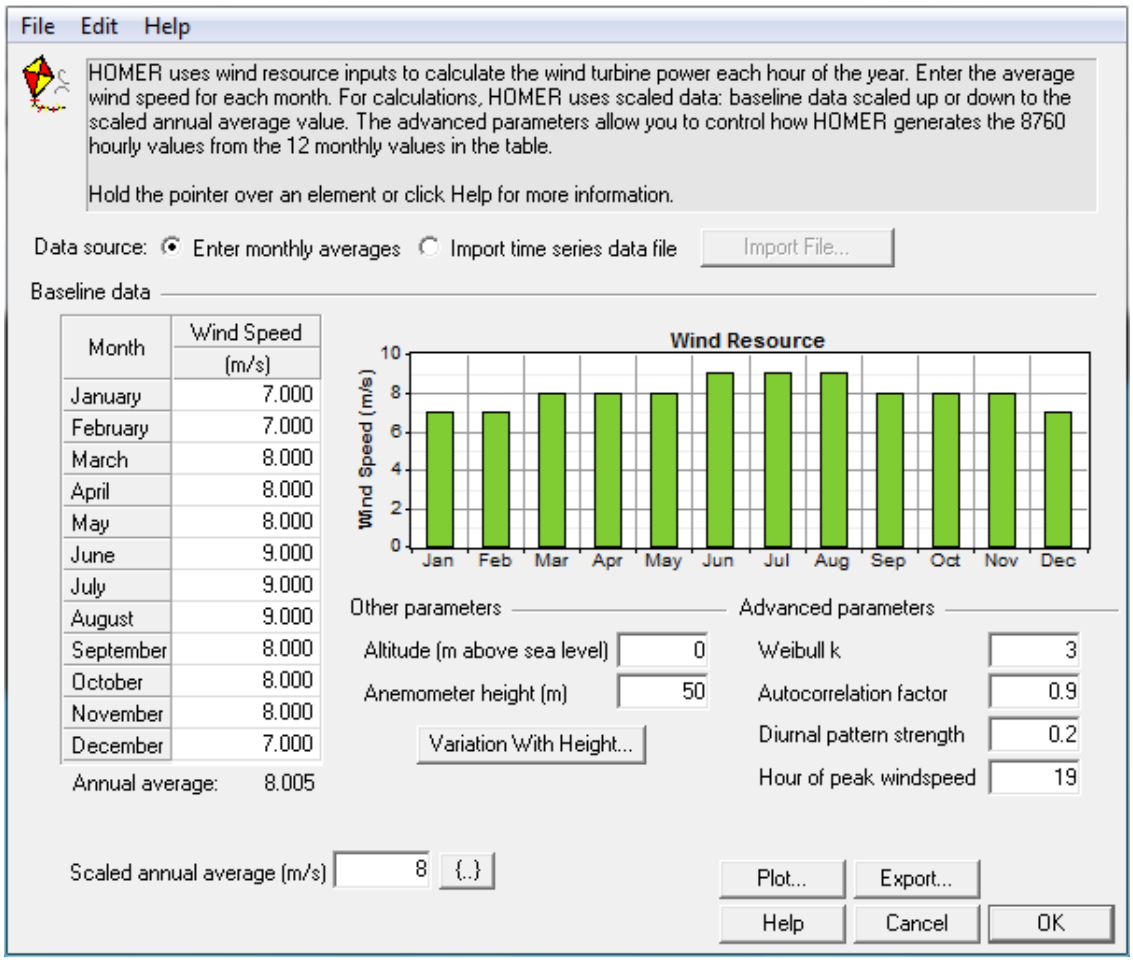


Figura 10- Tela das características dos ventos no local de instalação

Segue a descrição da tela referente à *figura 10*:

- Wind speed () : Velocidade média dos ventos em cada mês do ano.
- Altitude () : Altitude em metros acima do nível do mar.
- Anemometer height: Altura do anemômetro de medição. O programa realiza cálculos para estimar a velocidade do vento na altura onde as centrais geradoras operarão.
- Weibull k: Fator estatístico determinado pela variação de velocidades dos ventos.
- Autocorrelation factor: Fator que determina a aleatoriedade da velocidade do vento de hora em hora.
- Diurnal pattern strenght: Determina a quantidade de variação da velocidade do vento conforme a hora do dia.
- Hour of peak wind speed: Hora de pico de velocidade média do vento.
- Scaled annual average: Cria uma nova curva de velocidade com a mesma da dos valores inseridos, mas com nova média.

Existem duas formas de entrada de variáveis, pode-se importar uma série de dados disponível em um atlas de ventos, ou colocar os parâmetros manualmente.

---

[1] Disponível em http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/.

[2] Disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Betz'_law.

3. Obtenção de dados

Faz-se necessário para a simulação de um sistema de geração e fornecimento de energia o levantamento de uma vasta gama de dados, muitos desses dados, porém, não são informações de valor único, mas sim, vários valores distintos que dizem respeito à mesma grandeza. Ao se comparar formas distintas de geração de energia é necessário obter valores que ilustrem essas formas de maneira suficientemente precisa.

Para algumas informações a aquisição de um valor significativo é direta, enquanto, para outras há a necessidade de consolidação de dados. Ao intuir sobre os juros praticados para o financiamento de um projeto de energia alternativa existe um valor bem definido e de pouca variação, basta verificá-lo em agências de fomento ao desenvolvimento. O mesmo não ocorre quando se define o custo de instalação de uma unidade eólica, nesse caso, passa a existir uma grande variabilidade de preços e condições de instalação a serem verificadas, o que torna mais difícil a obtenção de um valor de grande generalidade.

Para resolver esses problemas os dados foram divididos em dois grupos: os de valor único e os de sensibilidade. Os valores únicos são referentes aos dados melhor estabelecidos (como um custo de construção de uma usina termoelétrica) ou de menor importância no resultado final (como o custo de manutenção anual de uma pequena central hidrelétrica). Valores únicos são normalmente provenientes de contratos reais recentes (comparados muitas vezes a outros valores em condições semelhantes) ou de um conjunto de dados referentes a condições reprodutíveis.

Os valores de sensibilidade são uma gama de variação ao redor de um valor típico obtido através da análise dos valores reais da variável. O *software "HOMER"* utiliza o nome de variáveis de sensibilidade para estes valores, um exemplo de dado que deve ser tratado desta forma é o custo do gás natural, embora seja simples conseguir o seu custo real, este é alterado com tanta rapidez que, caso não seja considerada uma variação em seu valor, o resultado fica limitado à perspectiva exclusivamente momentânea e com significância restrita. O valor central neste caso é a cotação do gás na bolsa, sendo que seus valores periféricos devem ilustrar a tendência atual de aumento de preço.

A obtenção desses dados centrais, sempre que possível, recorre a fontes operando em larga escala. Esse preceito se baseia na lei estatística dos grandes números, que garante que quanto maior o número de amostras maior a probabilidade de a distribuição tender à norma e, portanto, ao caso geral. Para efeitos de análise isso significa que os dados utilizados, sempre que possível, advém de várias amostras ou de uma amostra de grande porte e são reduzidos ao nível requerido. Os custos estimados nesse trabalho são exclusivamente de fontes de energia que pretendem atuar em larga escala e, portanto, devem ser comparadas com formas de geração consolidadas nesta mesma escala.

3.1. Fontes primárias de energia

Atualmente as principais formas de energia que se propõe a atuar em escala no sistema elétrico são: termoelétrica, hidroelétrica, solar fotovoltaica e eólica - a energia termonuclear será desconsiderada devido às suas características de carga e atual desinteresse a nível mundial por questões de segurança, portanto, a energia termelétrica descrita refere-se unicamente a energia térmica convencional.

3.1.1. Energia Termoelétrica

Devido a sua considerável independência com relação ao tempo a quantidade de dados agregados nas simulações de geração termoelétrica são menores. As variáveis utilizadas foram o custo do combustível, o custo de instalação, a manutenção horária da máquina e a curva de eficiência da queima. A *figura 11* mostra a tela de entrada de variáveis correspondente ao combustível - o valor limite de consumo não será utilizado, pois, será considerada ilimitada a disponibilidade de compra pelo preço estabelecido.

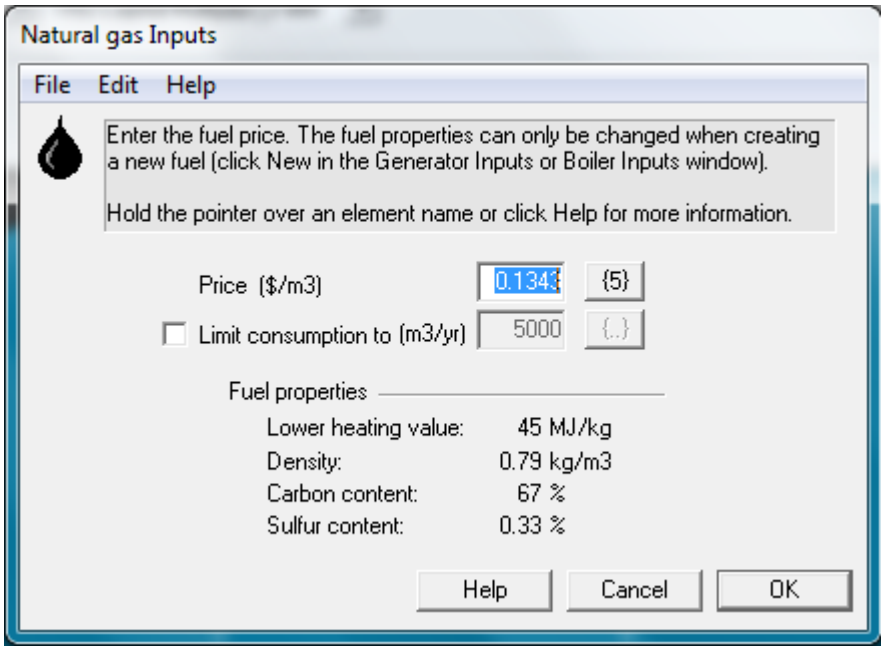


Figura 11: Variáveis de entrada referentes ao combustível.

O valor central do gás natural foi definido pela sua cotação na bolsa de valores[3] no fechamento do dia 25/10/2011 sendo de 3,795 dólares por B.T.U. (British Thermal unit) equivalente a 0,1343 dólares por m³. Para a análise de sensibilidade serão considerados inicialmente seis valores, sendo estes de 75%, 100%, 125%, 150%, 175% e 200% do valor central.

Os dados referentes à unidade geradora a gás consideram valores típicos de usinas de grande porte, o principal contrato analisado para a verificação da validade da estimativa de custo do livro *"Integration of alternatives sources of energy"* (FARRED; SIMOES, 2006, p.18) foram os custos de instalação da *termorio*[4], a maior usina a gás do Brasil. As características técnicas utilizadas foram as típicas de geração a gás. Os valores finais obtidos, segundo esta fonte[4], são de 800.000,00U$ por MW instalado, eficiência máxima próxima de 45% (FARRED; SIMOES, 2006, p.18) e valor de manutenção de 1,83U$ por hora de operação por MW instalado[5]. Os valores estimados estão de acordo com o estimado no livro (FARRED; SIMOES, 2006, p.18). Usinas de menor eficiência possuem custo inferior de instalação, mas tem um custo final maior, tanto financeiramente quanto ambientalmente. *A figura 12* mostra os valores aplicados ao gerador a gás.

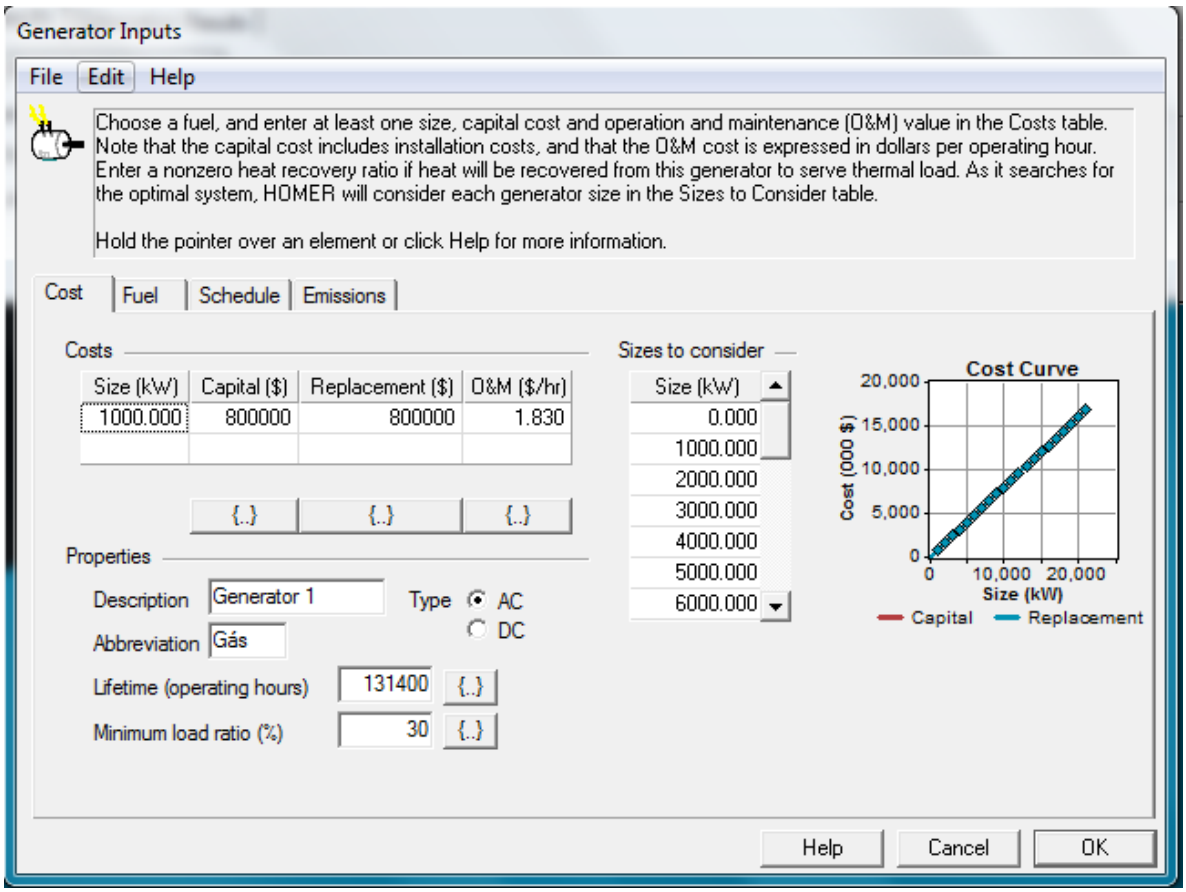


Figura 12: Tela de entradas das características do gerador a gás.

A carga mínima para ligamento do gerador foi mantida no valor padrão de 30% (esse valor se mostrou de pouca importância nos sistemas simulados). Note que a vida útil e o custo de operação horária foram derivados de valores anuais, a manutenção foi estipulada em 2% do valor de instalação por ano e o de vida útil em 15 anos.

3.1.2. Energia Hidroelétrica

O caso da energia hidrelétrica é diferente das demais formas de geração de energia renováveis, por ser muito bem estabelecida e ter praticamente atingido a maturidade tecnológica. A maioria dos países desenvolvidos esgotou seus potenciais hidráulicos devido à excelente resposta a flutuações de carga e aos custos desta forma de geração.

Nesse trabalho o rio que alimenta a pequena central hidrelétrica foi modelado para fornecer a essa determinada potência, o procedimento foi adotado dessa forma, pois, não é plausível estimar vazão ou altura de queda típica de um rio genérico para geração (devido à enorme variabilidade de condições onde esta forma de geração é viável). O rio foi modelado para seguir um regime sazonal de vazões e fornecer a potência preestabelecida conforme a *figura 13.* Para que a seja possível suprir a totalidade da carga com fonte hidrelétrica é necessário um valor de potência instalada maior do que o pico de consumo da carga, nesse caso foi utilizado um valor de 21000 kW instalados. O valor de eficiência do conjunto turbina gerador foi estimado em 90%, o mesmo valor assumido pela dissertação de mestrado de Faria (FARIA, 2011, p.150).

Observe que o *software* utilizado para as simulações considera que a altura de queda é dada pelo aspecto construtivo da unidade geradora, portanto esse valor consta na tela de edição da usina e não nas características do rio.

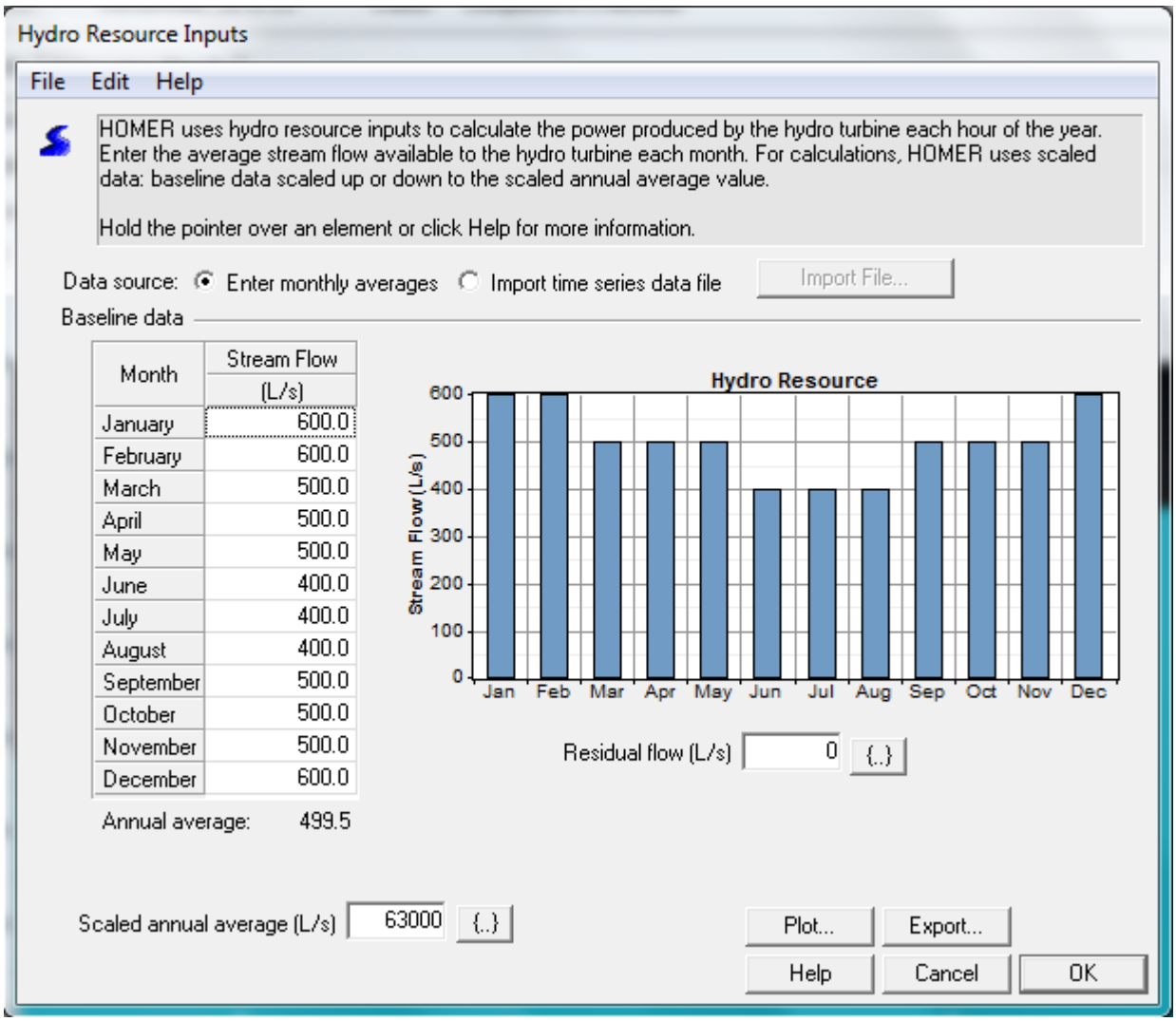


Figura 13: Tela de edição das características do rio.

O valor central do custo de instalação de uma PCH foi estipulado em 1300U$/kW. Esse valor se baseia na estimativa proposta pelo Professor Doutor Bermann[6] e pelo trabalho de dissertação (FARIA, 2011, p.150) já citado anteriormente. No estudo de caso dessa dissertação esse valor é o mais geral. Perceba que esse custo será variável de sensibilidade, assumindo uma gama de valores que acaba por generalizar essa análise. A *figura 14* mostra a tela de edição das variáveis referentes à pequena central hidrelétrica.

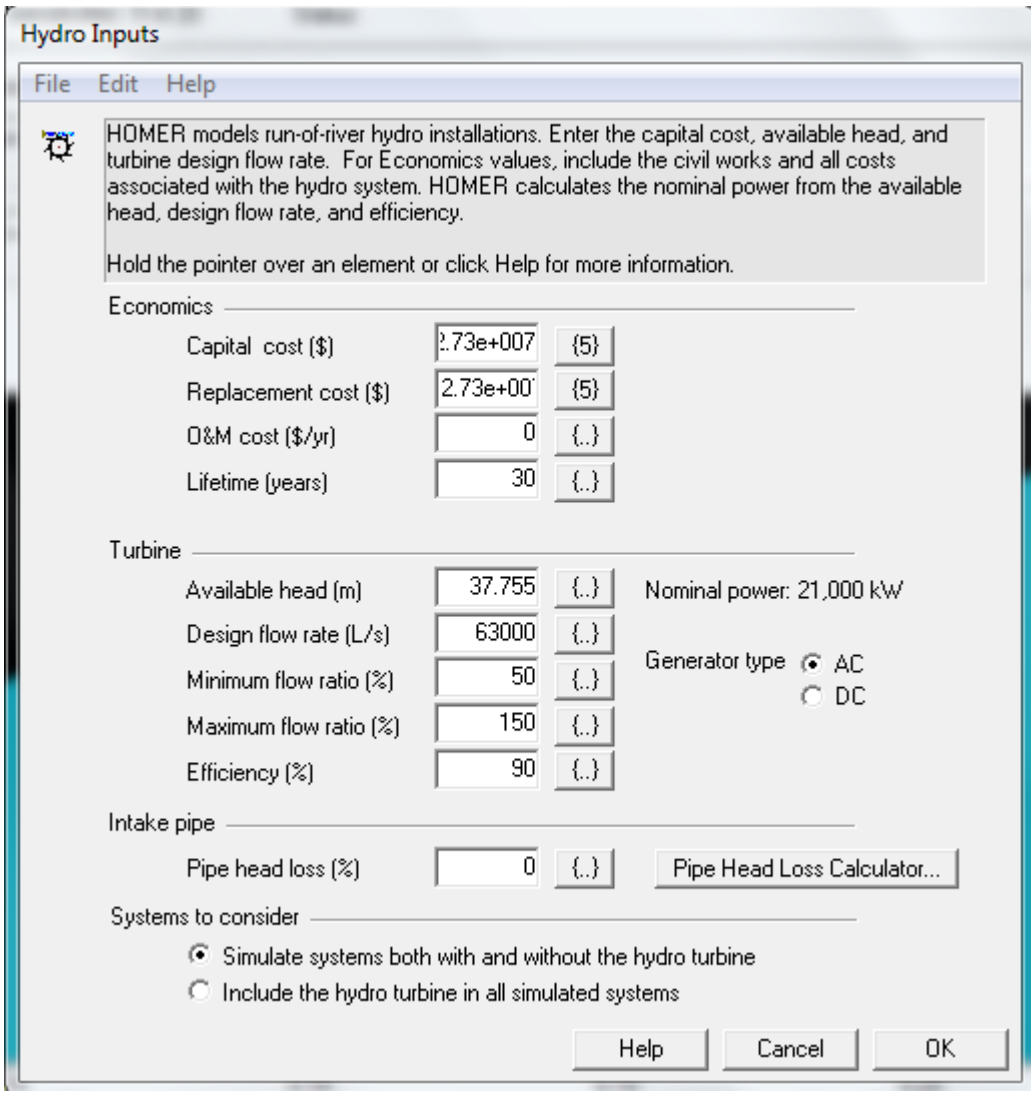


Figura 14: Tela de entrada das características do gerador hidroelétrico.

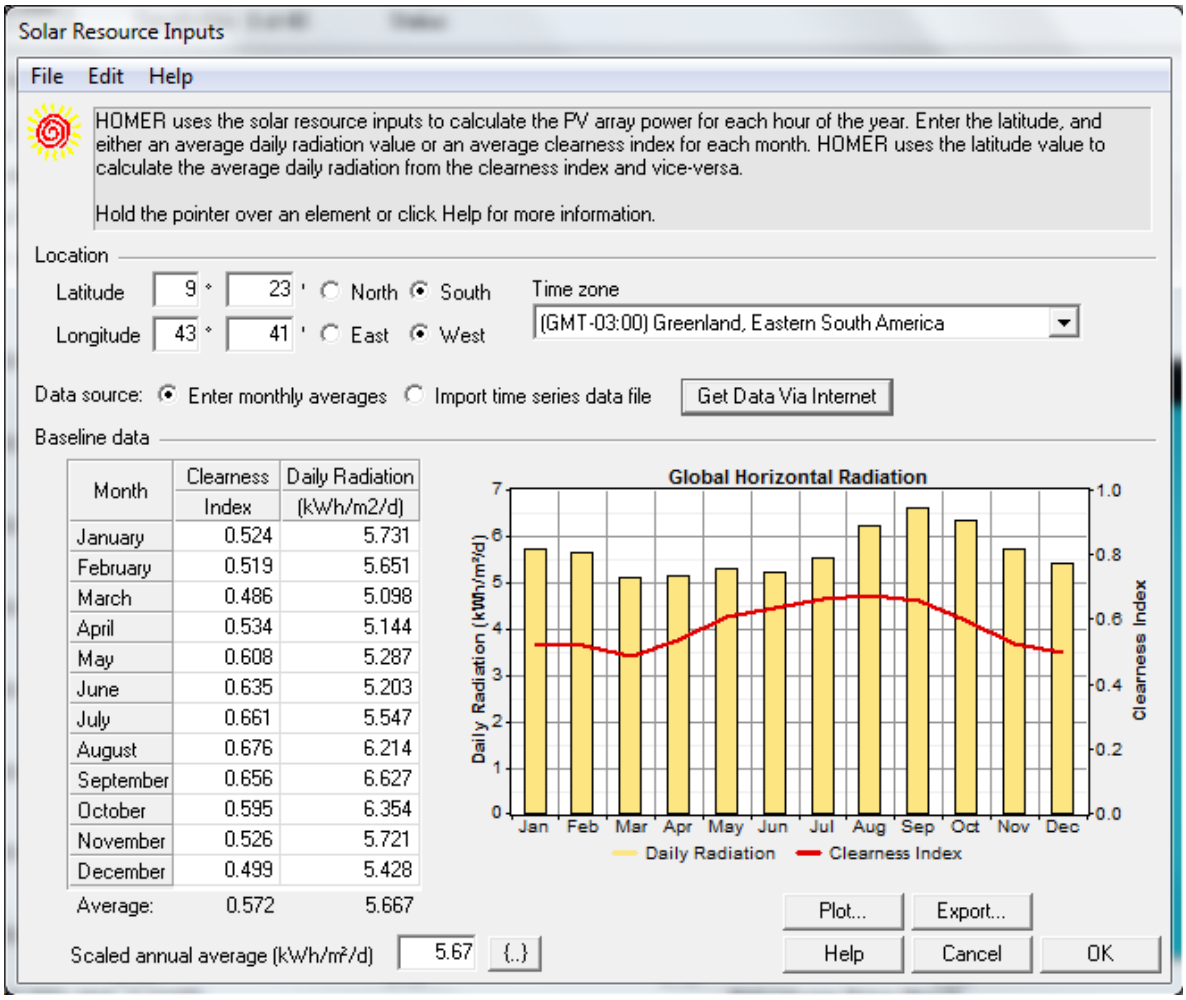
3.1.3. Energia Solar Fotovoltaica

A obtenção de dados para as unidades geradoras solares é mais simples do que para as outras fontes de energia, os painéis solares fotovoltaicos utilizados em grandes centros geradores são os mesmos comprados por indivíduos interessados em instalar energia solar em suas casas. Para as outras fontes de energia os equipamentos utilizados em larga são bastante diferentes daqueles para escala doméstica ou comercial (em pequena escala é possível utilização de geradores termelétricos, eólicos e até hidrelétricos, mas esses apenas para propriedades rurais). A fonte de energia desta forma de geração é a radiação solar.

Segundo o atlas de radiação solar no Brasil (TIBA, 2000, p.59), as melhores localidades para o aproveitamento estão no centro leste do país, um dos pontos com os melhores índices de horas diárias de insolação de potência de radiação está na fronteira do estado do Piauí com o estado da

Bahia. A cidade de Guaribas (PI) foi utilizada como base para obtenção das coordenadas geográficas, sendo, latitude 9 graus e 23 minutos sul e longitude 43 graus e 41 minutos oeste.

Uma vez que se refiram as coordenadas, o *software* acessa o banco de dados dos satélites da NASA referente aos índices de insolação daquele local. *A figura 15* mostra esses valores.



Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m2/d)
January	0.524	5.731
February	0.519	5.651
March	0.486	5.098
April	0.534	5.144
May	0.608	5.287
June	0.635	5.203
July	0.661	5.547
August	0.676	6.214
September	0.656	6.627
October	0.595	6.354
November	0.526	5.721
December	0.499	5.428
Average:	0.572	5.667

Figura 15: Insolação na localidade de instalação dos painéis.

Os custos dos painéis solares foram estimados com base no produto recomendado pelo maior fabricante de painéis fotovoltaicos[7] para grandes instalações (possui instalações de grande porte em pelo menos 5 países). O melhor preço encontrado para a placa *SUNTECH STP280-24Vd* foi de 438,08U$ unidade como parte de um conjunto de 21 painéis[8]. O preço por kW instalado é de 1564,62U$. Segundo o relatório da *Solar Energy Technology program* (SUTULA, 2007, p.53) o custo de operação e manutenção de um sistema fotovoltaico é de aproximadamente 0,03U$/kW, resultando nestas condições em 46,06U$/kW por ano, e o custo para infra-estrutura e instalação dos painéis é de 0,57 por Watt, resultando em 570U$/kW adicionais no custo dos painéis. A *figura 16* mostra a modelagem dos painéis.

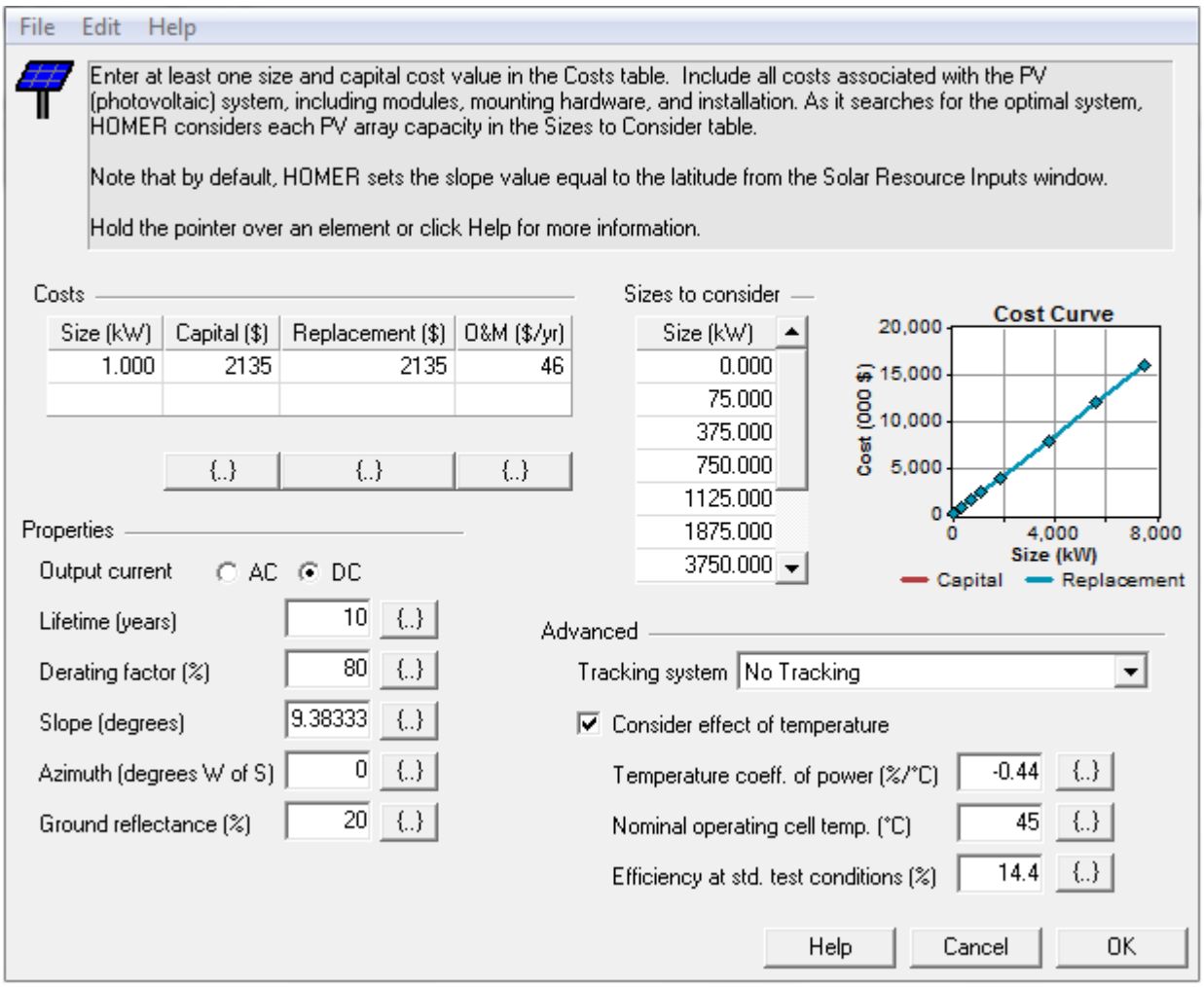


Figura 16:Tela de entrada das variáveis do painéis.

3.1.4. Energia Eólica

A energia eólica é dependente da presença de ventos. Os dados de velocidades e regime dos ventos foram extraídos do Atlas do Potencial eólico Brasileiro (AMARANTE; BROWER; ZACK, 2001, p. 31-43) sendo utilizados dados de localidades com viabilidade razoável para instalação das unidades. A viabilidade razoável é aqui definida por ventos de velocidade média próxima dos 8m/s a 50 de altura, uma vez que é um valor encontrado em diversas regiões do país onde ainda existe potencial inexplorado (vários estados do Sul, Sudeste e Nordeste do país possuem ventos com tal característica). Seria possível utilizar ventos mais velozes, mas a disponibilidade destes é geograficamente limitada.

Para efeitos de sazonalidade foi definida uma variação de 1m/s a menos nos meses de verão e 1m/s a mais nos meses de inverno, esta variação é baseada nas curvas de sazonalidade definidas pelo Atlas (AMARANTE; BROWER; ZACK, 2001, p. 31-43), segundo a mesma fonte, o horário de pico de ventos no Brasil é entre as 18 e 20h, uma vantagem considerável com relação a outros regimes de vento devido à coincidência com os picos de consumo.

O fator de auto correlação horária (1hr autocorrelaction factor) e a força do padrão diurno (diurnal pattern strenght) assumem valores baixos devido à constância dos ventos brasileiros. O fator *weibull k* também é definido pelo atlas e está entre 2,5 e 3,5 para as principais localidades geradores, para diminuir a margem de erro, será considerado 3.

A altura em relação ao nível do mar foi definida em zero, pois apesar de existir uma diferença na densidade do ar esta não é considerável em comparação com as outras altitudes onde é possível instalar usinas eólicas. Além disso, as localidades mais elevadas possuem temperaturas mais baixas, diminuindo ainda mais esta diferença de densidade (os pontos mais altos onde a energia eólica é viável no Brasil estão por volta de 1000m de altura com relação ao nível do mar). A *figura 17* mostra o resultado final.

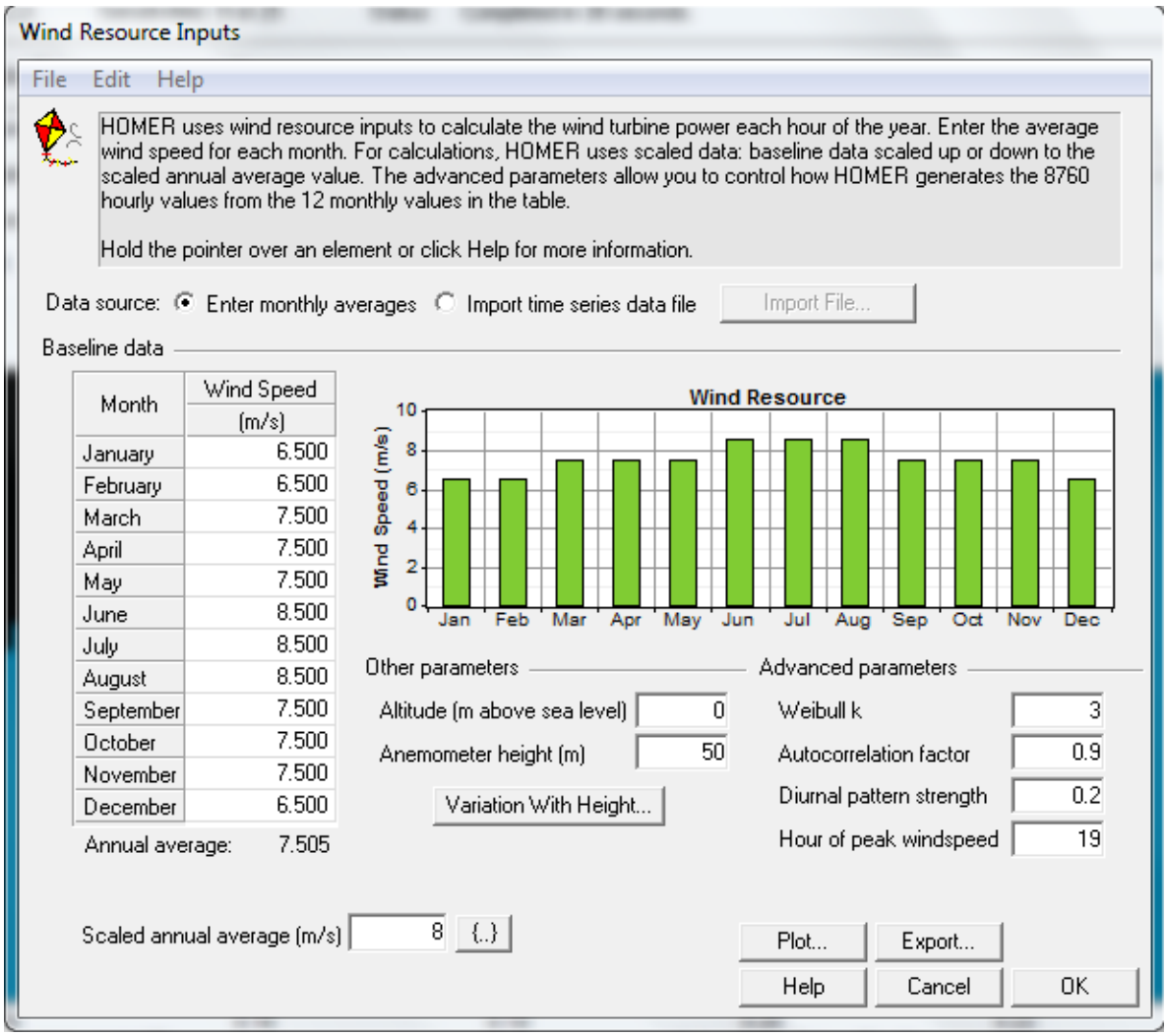


Figura 17: Tela de edição das características dos ventos na localidade de instalação.

Atualmente existem unidades geradoras com picos em diferentes velocidades e para diferentes alturas. Para os cálculos de custo, serão utilizadas unidades *Vestas V82* (Manual Vestas V82, ano não disponível) de 1,65MW, essas unidades foram escolhidas por serem produzidas pela maior empresa produtora de turbinas eólicas, possuírem curva de geração condizente com o potencial

eólico brasileiro e por terem uma potência adequada às simulações realizadas (a carga média será de 10 MW o que leva a uma necessidade de unidades suficiente para ilustrar as curvas de custos). Essas turbinas de 83m de diâmetro de varredura das hélices e altura do rotor de 70 ou 80m para 50 ou 60 Hz já possuem potencial instalado total superior a 2 GW.

A curva característica original e a inserida no *software* estão respectivamente nas *figuras 18 e 19*

Os valores de custo utilizados não são próprios dessa unidade (embora sejam bastante próximos), mas valores típicos de instalação de unidades eólicas. O valor está cotado atualmente em cerca de 1800 U$ por kW instalado, segundo uma reportagem da emissora *bloomberg* [9] lançada em 23 de fevereiro de 2011 o custo de compra das unidades eólicas era de aproximadamente 1,4 milhões de dólares por MW (1400$/kW) para a unidade entregue, houve um pico de custo dessa energia em 2009, onde segundo a mesma reportagem o custo médio do kW chegou a quase 2000U$. Um contrato fechado no Brasil para instalação de unidades eólicas no Rio de Janeiro, publicada pelo jornal *o globo*[10] indica um valor total de contrato de 600 milhões de reais para 135MW instalados, o que resulta (segundo a cotação do dia 25/10/2011 de 1,76 reais o dólar) em aproximadamente 340 milhões de dólares, ou 2008 U$ por kW.

Observe que o valor exato tem sua importância reduzida pelo fato de ser este valor uma variável de sensibilidade, e, nesse caso, haverá uma variabilidade de pelo menos 25% para mais e 75% para menos, esse valor será considerado sempre como variável de sensibilidade devido a sua grande variação e tendência de redução devido a novas tecnologias e a massificação de produção de geradores dessa energia (teve seu custo reduzido em mais de 10 vezes nos últimos 25 anos). Os valores padrões de sensibilidade são 25%, 50%, 75%, 90%, 100%, 125% do valor central, nota-se que essa variação cobre um valor de custo de instalação bruto de 450 até 2.250 U$ por kW instalado.

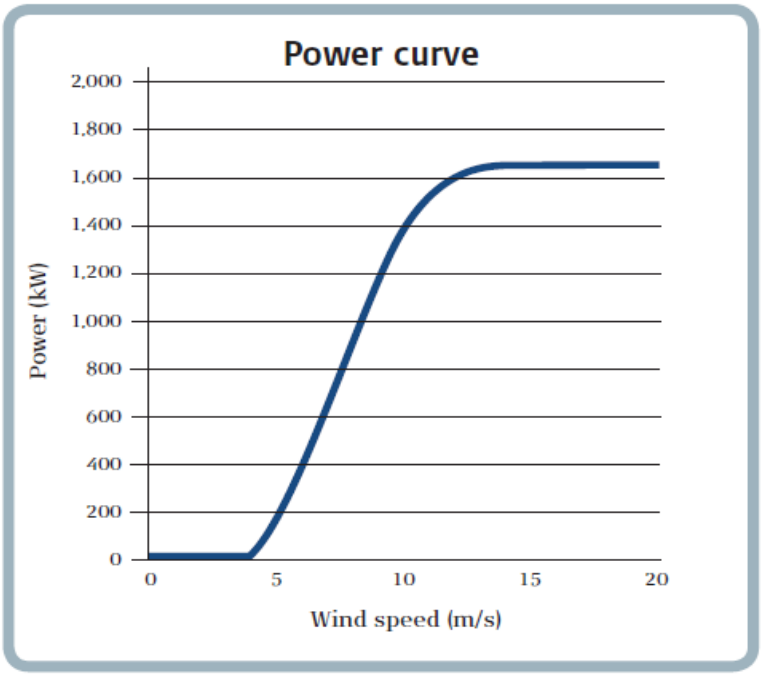


Figura18: Curva retirada do manual da empresa *Vestas V82.*

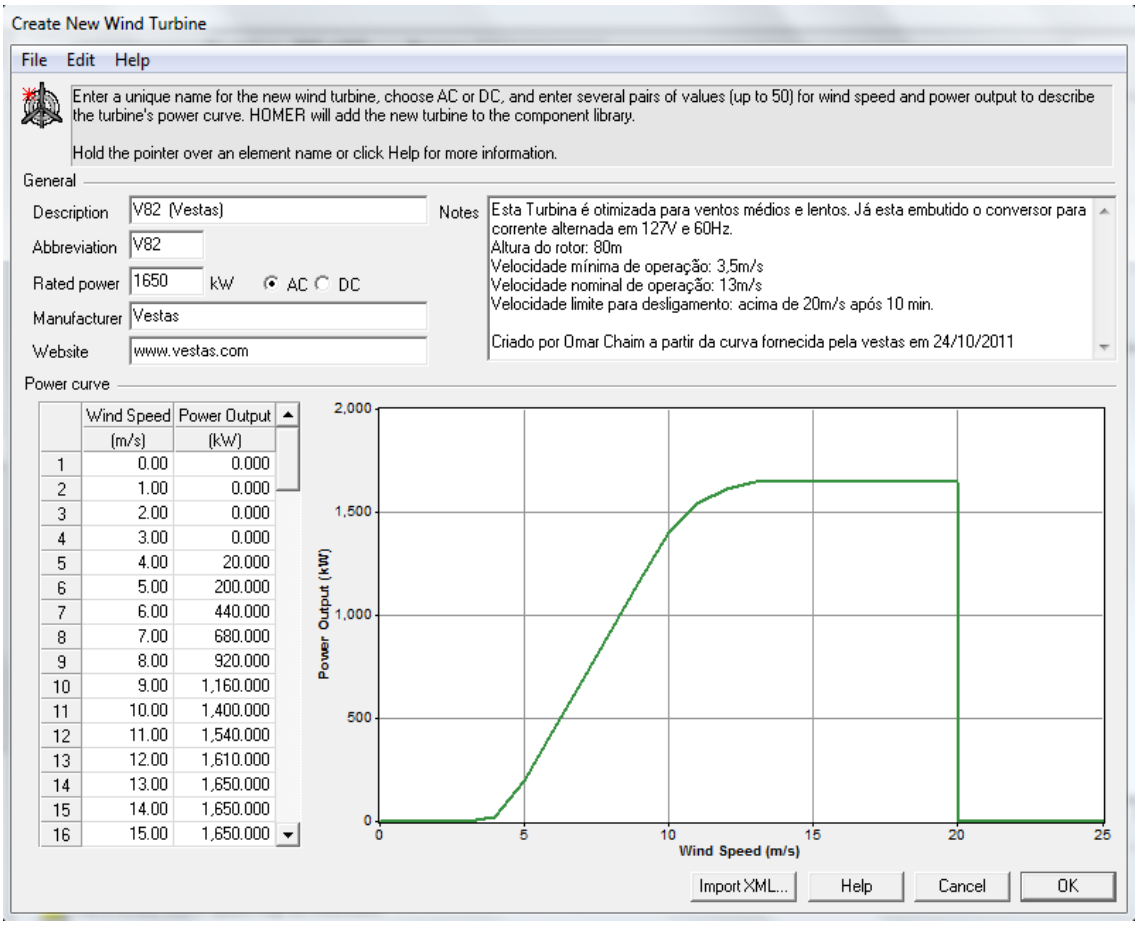


Figura 19: Características da unidade *Vestas V82* atualizadas

A *figura20* mostra os dados gerais da unidade geradora eólica utilizada nas simulações

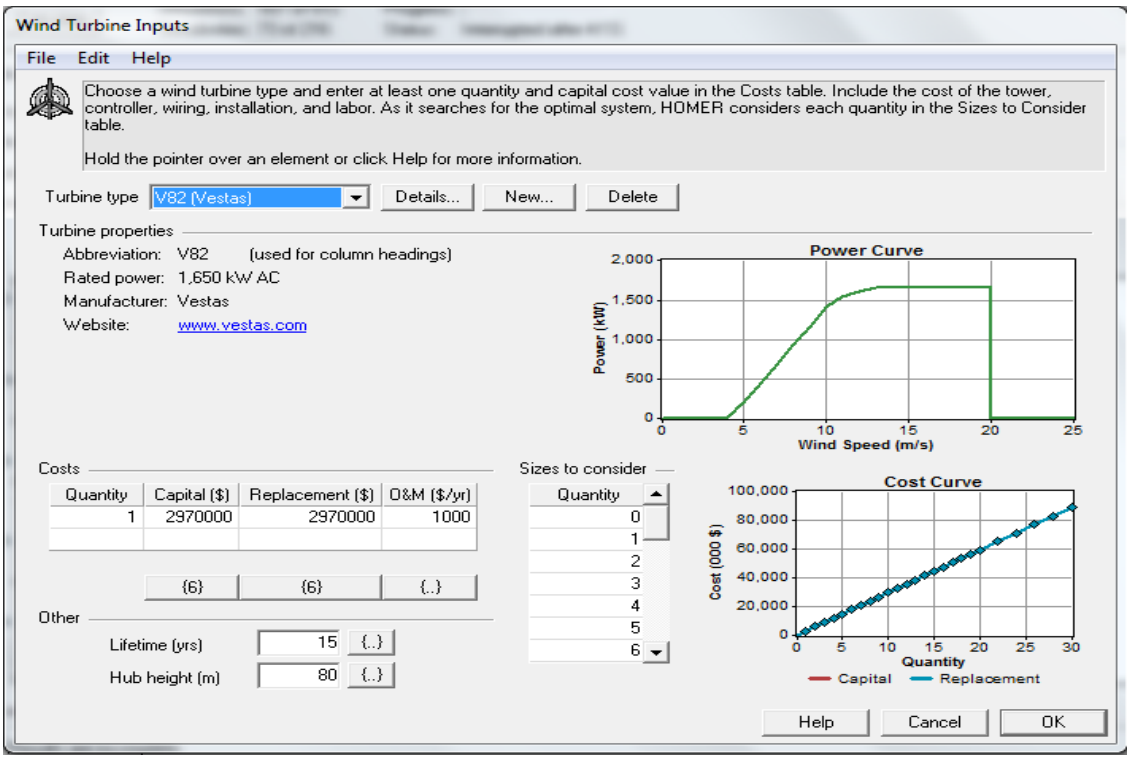


Figura 20: Tela de edição das variáveis de análise da unidade geradora eólica.

Cada uma das variáveis acima está descritas no Capítulo 2.

O custo anual de operação e manutenção foi estimado com base em dois artigos[11] e é considerado 1.7 centavos de dólar por kW gerado.

3.2. Dados econômicos

Projetos de geração de energia elétrica requerem um grande investimento de capital, o que torna os parâmetros econômicos determinantes no ponto ótimo de operação de um sistema. Os dois principais parâmetros são a taxa de juros anual e o tempo de vida do projeto. No caso da taxa anual o valor normal de financiamento de projetos de energia renovável é inferior à taxa básica de juros estabelecida pelo governo. Os valores utilizados nesse trabalho se baseiam na taxa praticada pela *Nossa Caixa Desenvolvimento*, a agência de fomento do estado de São Paulo.

Esta agência possui uma linha de financiamento para energias renováveis com taxa de 0,49% ao mês[12] (o equivalente a uma taxa de juros anual de 6,04). Outra taxa a ser utilizada é a taxa básica de juros, estipulada em 11,5%[13], para que seja visível o efeito deste incentivo. Quando considerada uma variável de sensibilidade assume os valores de 3, 6 e 11,5% ao ano, isso se faz necessário não só para o cálculo do custo, mas principalmente para a visualização do efeito dos juros na matriz energética. A geração termoelétrica, por exemplo, tem um custo de instalação inferior ao de uma hidrelétrica, porém sua operação é cara (devido aos custos de combustível) sendo assim beneficiada por juros maiores. Atualmente todas as formas de geração de energia

renovável se beneficiam mais de juros baixos do que suas concorrentes tradicionais (a possível exceção é a energia nuclear, que também requer um investimento inicial robusto).

O tempo de vida do projeto é utilizado para determinar a duração de funcionamento deste sistema. Para manter a neutralidade deve ser suficientemente grande para que seja visível o efeito do tempo de vida útil dos equipamentos.

Como nesse trabalho o foco não é na execução de um projeto especifico e sim em uma análise de tendências e custos, os valores de capital fixo e custos de operação geral do projeto serão desconsiderados por serem aplicados ao projeto como um todo, e não a cada elemento analisado.

A penalidade por não fornecimento será também desconsiderada, uma vez que o sistema será modelado para suprir completamente a carga, nenhuma simulação poderá superar uma falha de suprimento superior 0,5% ou será remodelada.

A *figura 21* representa a tela de entrada das variáveis econômicas.

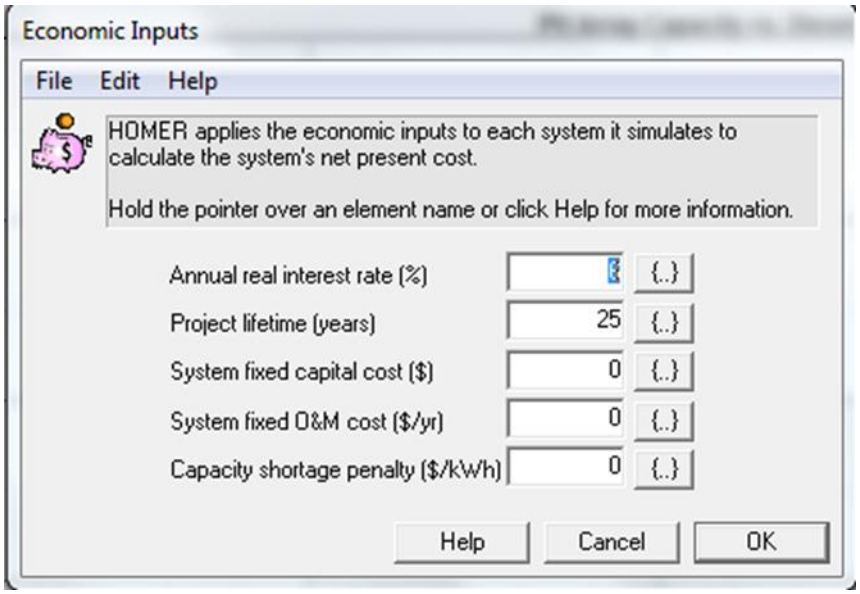


Figura 21: Tela de edição das características econômicas.

3.3. Elementos do sistema

Um sistema elétrico funcional necessita de ao menos uma carga, uma fonte e uma forma de transmissão de energia para operar. Esses elementos estão modelados nas simulações de uma forma mais detalhada, diferenciando fontes, conversores, inversores e linhas de transmissão.

3.3.1. Carga

Para o perfil de carga, foi gerada uma curva genérica com um consumo de energia médio de 10 MW/h (240 MW/h dia), esse número foi escolhido por ser suficientemente grande para modelar um

sistema composto com mais múltiplos geradores por fonte de energia, valores maiores apenas elevariam o esforço computacional. Esse perfil foi baseado nas curvas publicadas pelo *ONS* em um estudo de variação de consumo em função da temperatura (ONS, 2002, p.4). Observe que existe interesse apenas na forma de onda uma vez que os valores serão substituídos para assumir o valor médio escalonado. A *figura 22* mostra a forma final da curva de carga.

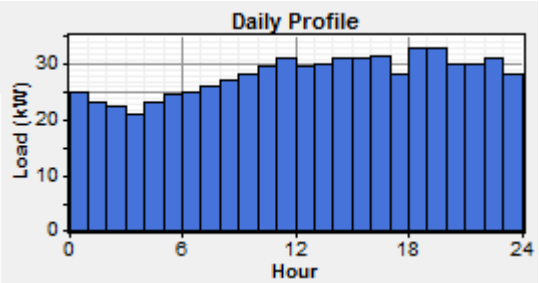


Figura 22: Curva de carga utilizada

Obter uma boa aproximação do perfil de carga é essencial devido à ausência de formas eficazes de armazenamento de energia em escala, a fonte deve fornecer energia no instante em que a carga a demanda, fazendo com que fontes com melhor resposta a oscilações tenham um fator de carga mais elevado, tornando-se então relativamente mais baratas. Uma usina termelétrica a carvão tem a necessidade de suprir apenas energia de base, (aquele valor de energia que é consumido em grande parte do tempo) enquanto a energia mais cara fornecida nos picos de consumo, no Brasil, é proveniente predominantemente de hidrelétricas, que têm uma melhor capacidade de resposta às flutuações de sistema. Na *figura 22* podemos considerar a energia produzida até aproximadamente 20 kW como energia de base, até cerca de 25kW como energia intermediária e o restante são picos de energia.
Devido a esta característica de consumo as energias alternativas necessitam normalmente, para suprir completamente a demanda, de uma parcela de energia convencional para retaguarda.

3.3.2 Conversores e baterias

Enquanto alguns geradores trabalham diretamente em corrente alternada, outros necessitam de conversões para poderem ser interligados à rede. A energia solar e eólica são geradas em corrente contínua, precisando, portanto de conversão. As unidades geradoras eólicas normalmente possuem o conversor embutido na montagem e no custo, sendo então ligadas diretamente na rede, o mesmo não acontece com painéis solares. No caso de necessidade de conversão externa à unidade geradora é adicionado um conversor *cc/ca* e *ca/cc* externo cujo custo será utilizado em um valor único estimado em 565U$ por kW[14] (baseado no modelo *I.Solarmax 100C*). A *Figura 23* mostra as entradas referentes ao conversor.

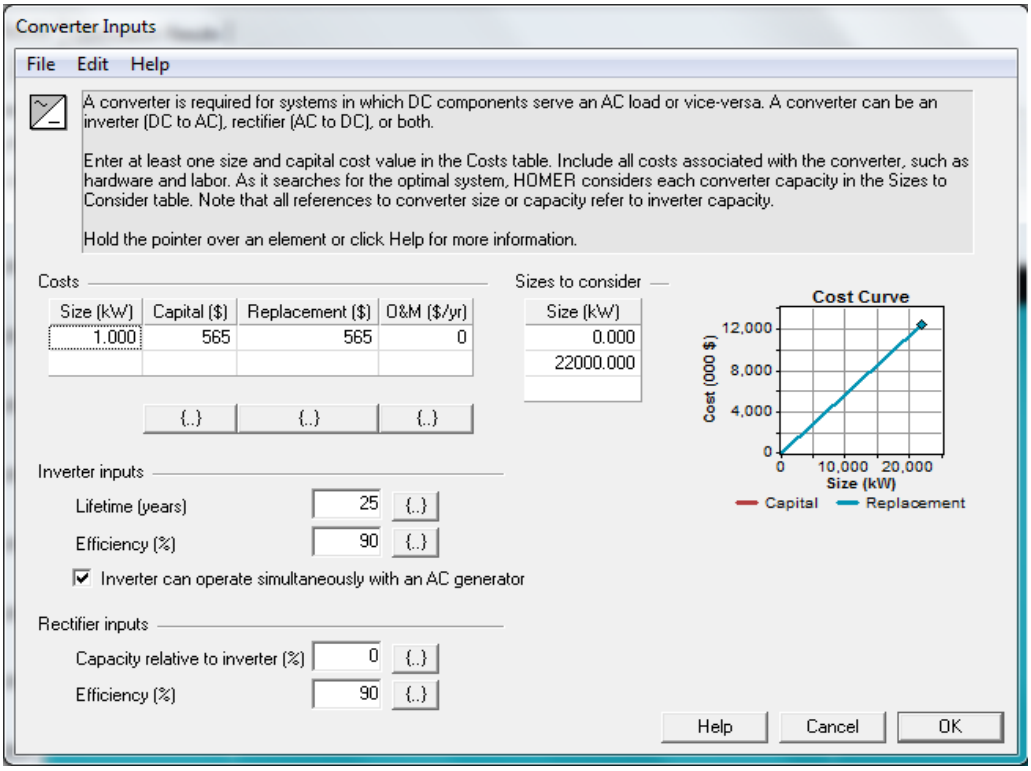


Figura 23: Tela de edição do conversor utilizado.

A energia solar pode aumentar consideravelmente sua eficiência se associada com um banco de baterias, essa associação permite alterar o momento de fornecimento da energia solar (cujo pico de geração é próximo do meio dia) para melhor se ajustar ao perfil de carga. A bateria escolhida foi a versão atual da maior unidade projetada para sistemas solares modelada pelo *software, a Hoppecke OPzS 4340*, com um custo central estimado em 1355U$[15] (convertido a partir de euros pela cotação de 25/10/2011 de 1,42 dólares o euro). Foi necessário remodelar a bateria chegando à forma ilustrada na *figura 24*[16].

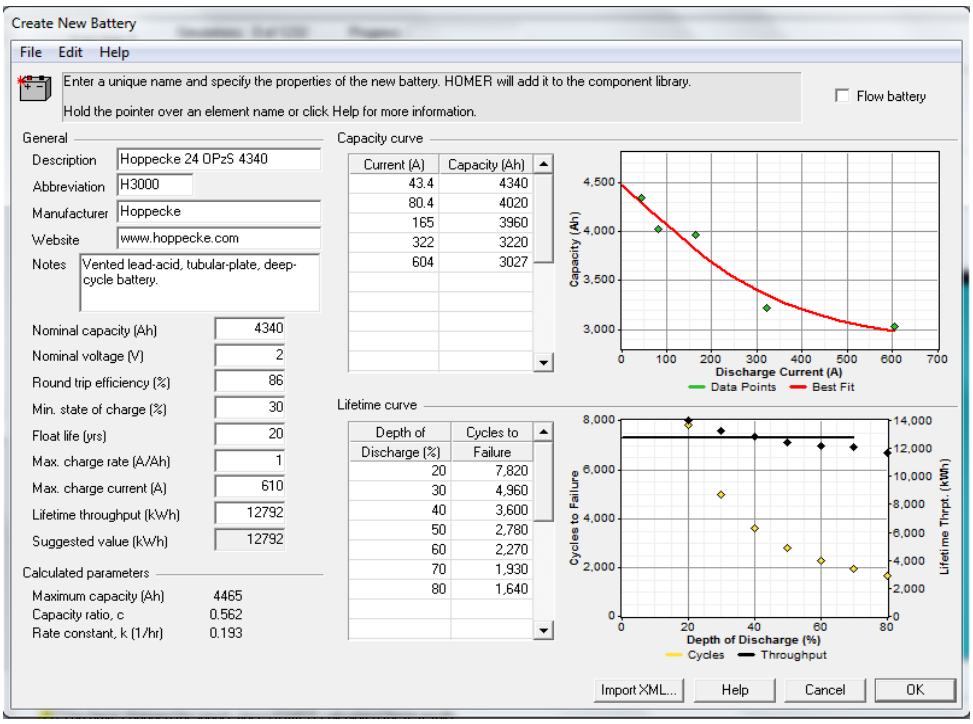


Figura 24:Tela de criação de bateria.

O custo da bateria é modelado chegando a forma presente na *figura 25.*

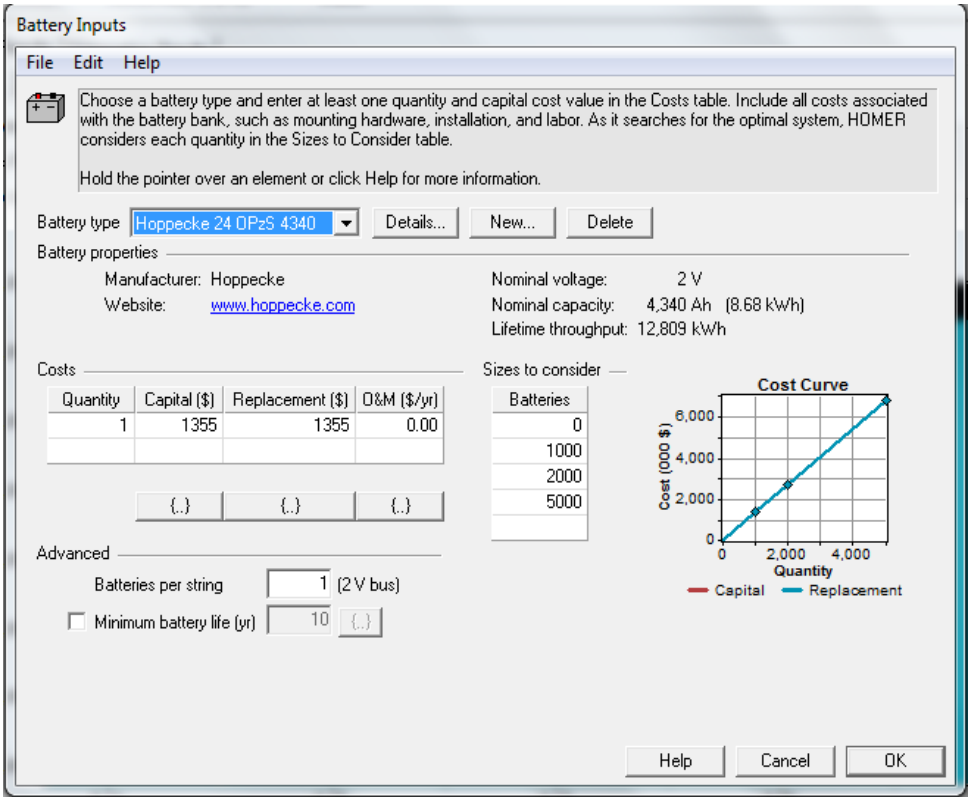


Figura 25:Tela de edição das características da bateria.

3.3.3. Rede elétrica

A rede elétrica modelada será apenas um vendedor de energia, a recompra não será utilizada, pois o sistema modelaria muitas vezes fontes adicionais exclusivas para vender energia, o que seria contraproducente uma vez que o interesse principal é a verificação do preço de fornecimento de energia para a carga.

Os preços limítrofes utilizados cobrem do menor ao maior valor presentes nos atuais leilões de energia[17], a variação para fins de análise é de 20U$ até 120U$ o MW. Os passos utilizados são normalmente de 10U$/MW.

---

[3] Disponível em http://www.forexpros.com.pt/commodities/natural-gas-historical-data.

[4] Disponível em http://www.cogenrio.com.br/Prod/Casos.aspx?Noticia=3

[5] Disponível em http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAfAkAH/estudos-viabilidade-economica-usinas-termoeletricas.

[6] Disponível em http://www.socioambiental.org/esp/bm/inv.asp.

[7] Disponível em http://ap.suntech-power.com/en/products/utility-scale.html.

[8] Disponível em http://www.affordable-solar.com/store/solar-panels-by-the-pallet/Suntech-STP280-24-Vd-280W-Solar-Panel_3-pallet-21.

[9] Disponível em http://www.bloomberg.com/news/2011-02-07/wind-turbine-prices-fall-below-1-million-euros-per-megawatt-bnef-says.html.

[10] Disponível em http://oglobo.globo.com/economia/mat/2011/06/10/rio-ganhara-primeiro-parque-eolico-com-investimento-de-600-milhoes-924664488.asp.

[11] Disponível em http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-3-economics-of-wind-power/chapter-1-cost-of-on-land-wind-power/operation-and-maintenance-costs-of-wind-generated-power.html.

[12] Disponível em http://www.nossacaixadesenvolvimento.com.br/portal.php/linhas-financiamento #projetos-de-investimento.

[13] Disponível em http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2011/10/banco-central-explica-reducao-da-taxa-basica-de-juros-para-115-ao-ano.html.

[14] Disponível em http://todoelectronica.com/JH.pdf preços de inversores.

[15] Disponível em http://www.solar-qqq.de/product_info.php?info=p185_Hoppecke-OPzS.html.

[16] Disponível em http://www.windandsun.co.uk/Prices/prices_batteries.htm.

[17] Disponível em http://www.mme.gov.br/mme/menu/leiloes_de_energia/leilao_de_eolica.html.

4. Simulação Exemplo

4.1. Introdução

Devido a grande quantidade de dados obtidos em cada simulação, apenas uma será documentada em detalhes neste trabalho para ilustrar as ferramentas de análise disponibilizadas pelo *software "HOMER"*.

A simulação escolhida para esta amostra é a comparativa entre eólica e um gerador convencional a gás natural não conectado ao sistema interligado. As variáveis de sensibilidade serão o custo do combustível, o custo de instalação das usinas eólicas e os juros anuais. As obtenções das estimativas estão descritas no capítulo 3.

4.2. Dados de Entrada

A tabela1 traz o resumo dos valores utilizados nesta simulação:

Custo	Valor Estimado Central	Valor Mínimo Assumido	Valor Máximo Assumido
Unidade Geradora a Gás	800U$/kW	1000 kW	22000kW
Unidade Geradora Eólica	1800 U$/kW	1un. de 1650 kW	30un. De 1650kW
Gás Natural(m³)	0,1343	0,101	0,27
Juros anuais	6,00%	1,50%	De 3% até 15%

Tabela 1. Custos utilizados

Entre os valores máximos e mínimos foi definido um passo mínimo de 1000 kW, devendo haver uma diferença de pelo menos 5% entre cada passo. Quanto mais próximo do passo mínimo, maior a precisão, por isso, este foi utilizado sempre que possível. Os valores de máximo foram definidos até que o espaço de simulação fosse suficiente, ou seja, não houvesse necessidade de mais unidades para suprir totalmente a carga.

Os valores obtidos com base neste procedimento estão descritos em duas tabelas. As potencias do gerador a gás constam na tabela 2 e os número de unidades eólicas na tabela 3.

Tabela 2. Potencias do gerador a gás em MW										
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22

Tabela 2: Valores utilizados para o gerador a gás

Tabela 3. Quantidades de unidades eólicas Vestas V82												
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	26	28	30

Tabela 3:Valores utilizados para as unidades eólicas

Com estes valores foi modelado um sistema contendo uma curva de carga a ser suprida exclusivamente por geradores eólicos e a gás natural. *A figura 26* mostra o sistema modelado no *software*.

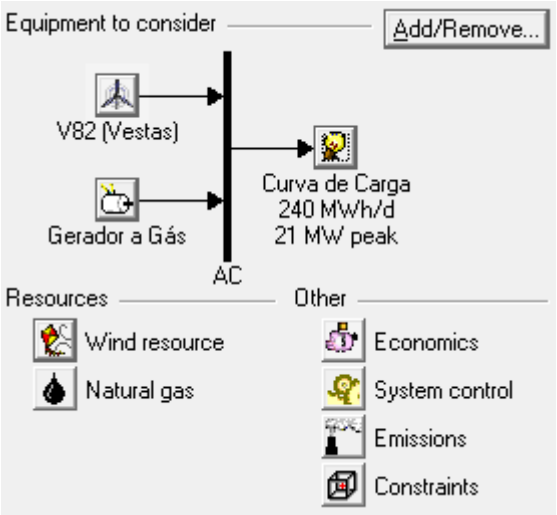


Figura 26: Elementos modelados no sistema.

4.3. Esforço Computacional

Uma vez modelado o sistema a simulação foi iniciada. Para esse sistema foram necessárias 572 simulações em 108 sensibilidades, ou seja, 61.776 iterações para obtenção do resultado. Este número demonstra o esforço computacional necessário ao lidar com tantas variáveis e a razão de não serem utilizadas mais variáveis de sensibilidade. O número de simulações é fruto das quantidades de elementos disponíveis para utilização, como por exemplo, o número de unidades geradoras eólicas. É composto neste caso pela multiplicação simples entre os 26 valores possíveis de unidades geradoras eólicas e 22 possibilidades de potência instalada do gerador a gás. As sensibilidades são fruto dos múltiplos valores assumidos pelo custo da unidade eólica (6),

pelos juros (3) e pelo custo de gás natural resultando (6) em 108 sensibilidades. O tempo total de simulação no computador utilizado foi de 6 minutos e 56 segundos.
O incremento do esforço computacional é exponencial. Caso o mesmo procedimento de sensibilidade fosse aplicado a outras duas variáveis (como a velocidade do vento e o custo de instalação da termelétrica) teríamos um tempo total de simulação superior a 7 horas. Ainda seria possível utilizar carga média, custo de operação e diversas outras variáveis como sensibilidades, mas isso teria efeito muito maior no esforço computacional do que na significância do resultado.

4.4. Resultados Obtidos:

O objetivo dessas simulações é verificar o atual estado de custos de geração de energia elétrica e a influência de certos fatores na composição destes valores. Os resultados da simulação são expressos em uma grande diversidade de gráficos, tabelas e listas, porém apenas alguns são relevantes para a análise proposta.
Em qualquer sistema, mesmo sem variáveis de sensibilidade, o *software* retorna os valores de operação ótimos de um sistema. Esses valores consideram todas as combinações possíveis com as entradas ministradas para fornecer o sistema de menor custo que seja compatível com as especificações técnicas definidas. Se houverem variáveis de sensibilidade, tornam-se disponíveis diversos gráficos e curvas combinando essas variáveis com informações que podem ser relevantes.

4.4.1. Gráficos:

A principal motivação da utilização dos gráficos disponibilizados pelo *software* nesse trabalho é a visualização de tendências gerais do sistema. Uma vez que os gráficos são baseados apenas no ponto de ótimo em determinadas condições, poucas informações são obtidas com relação ao custo individual de energia de cada fonte. Para isso são utilizadas as tabelas de otimização (cada losango nos gráficos marca um otimização completa) dos pontos de interesse. Os principais pontos de interesse são aqueles onde uma forma de geração se torna viável e/ou o ponto central da análise.
Dentre os gráficos fornecidos os de maior interesse nesse sistema são: o tipo de sistema ótimo (optimal system type); os gráficos de superfície (surface plot) referentes ao número de unidades eólicas instaladas, capacidade do gerador a gás, custo por kW (levelized cost of energy), porcentagem de energia renovável e eletricidade total produzida.
O gráfico da *figura 27* é um gráfico de tipo de sistema ótimo. Em cada região do gráfico, delimitados pelas sensibilidades, um tipo de geração torna a energia mais barata, neste caso o tipo é ou puramente a gás natural ou misto, utilizando tanto gás natural quanto energia eólica.

No caso especifico desse exemplo, a representação mostra o tipo de ponto ótimo com taxa de juros a 6% ao ano (valor central), sendo este exclusivamente a gás na área preta do gráfico e misto na área azul. Os losangos espalhados pela figura mostram os valores assumidos em cada conjunto de simulações, Cada um desses é um conjunto completo de simulações no qual é determinado qual o tipo de geração que fornece a energia com o menor custo. O valor central assumido neste caso é o cruzamento da linha referente ao custo de capital unitário com o valor do custo de gás de 0,1343U$, resultando em um sistema exclusivamente térmico.

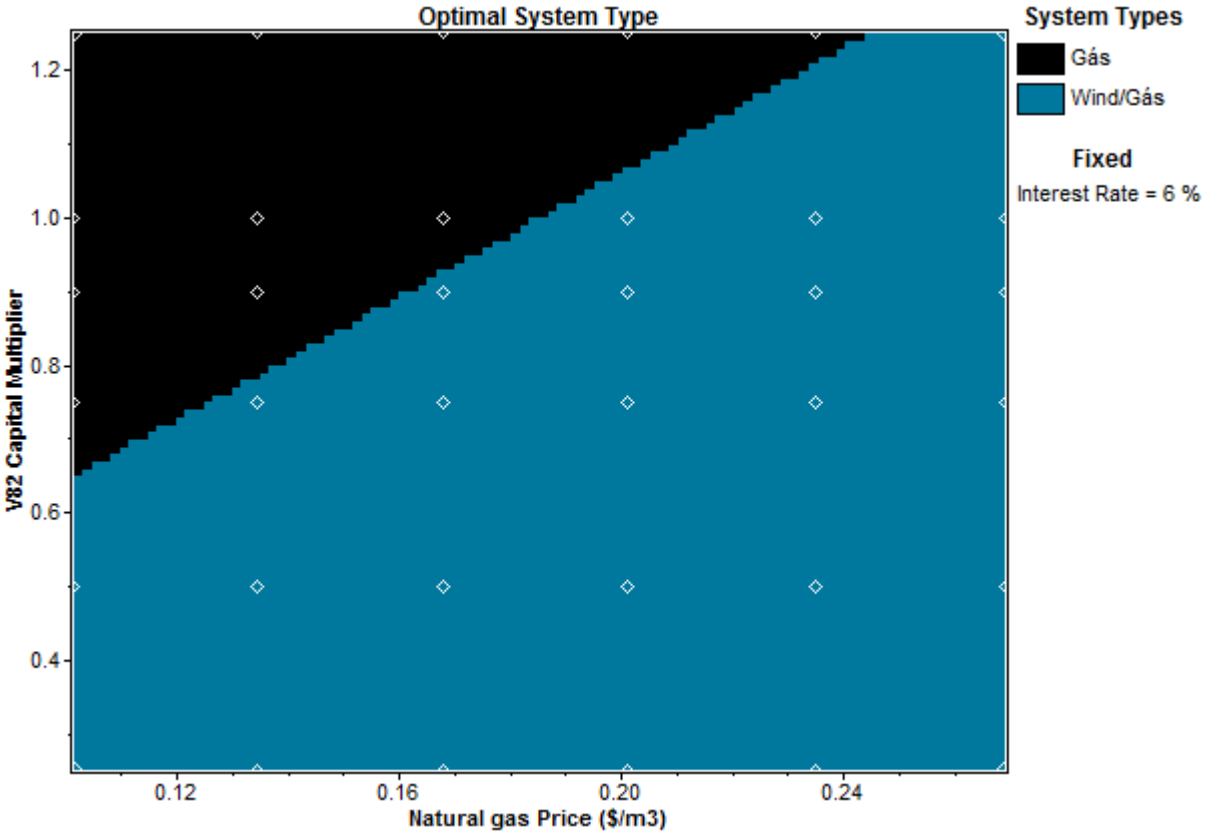


Figura 27: Sistema ótimo para taxa de juros de 6% ao ano.

É interessante observar o efeito do aumento ou diminuição de juros na composição do sistema. É possível alterar a terceira variável de sensibilidade para assumir qualquer um dos valores iterados. A *figura 28* mostra o maior valor de juros simulado (11,5% ao ano). Juros mais baixos do que o central apenas reduzem a área preta no gráfico. Mesmo para a taxa de 3% ao ano os valores centrais ainda apontam para o sistema puramente térmico. A *figura 29* mostra este efeito.

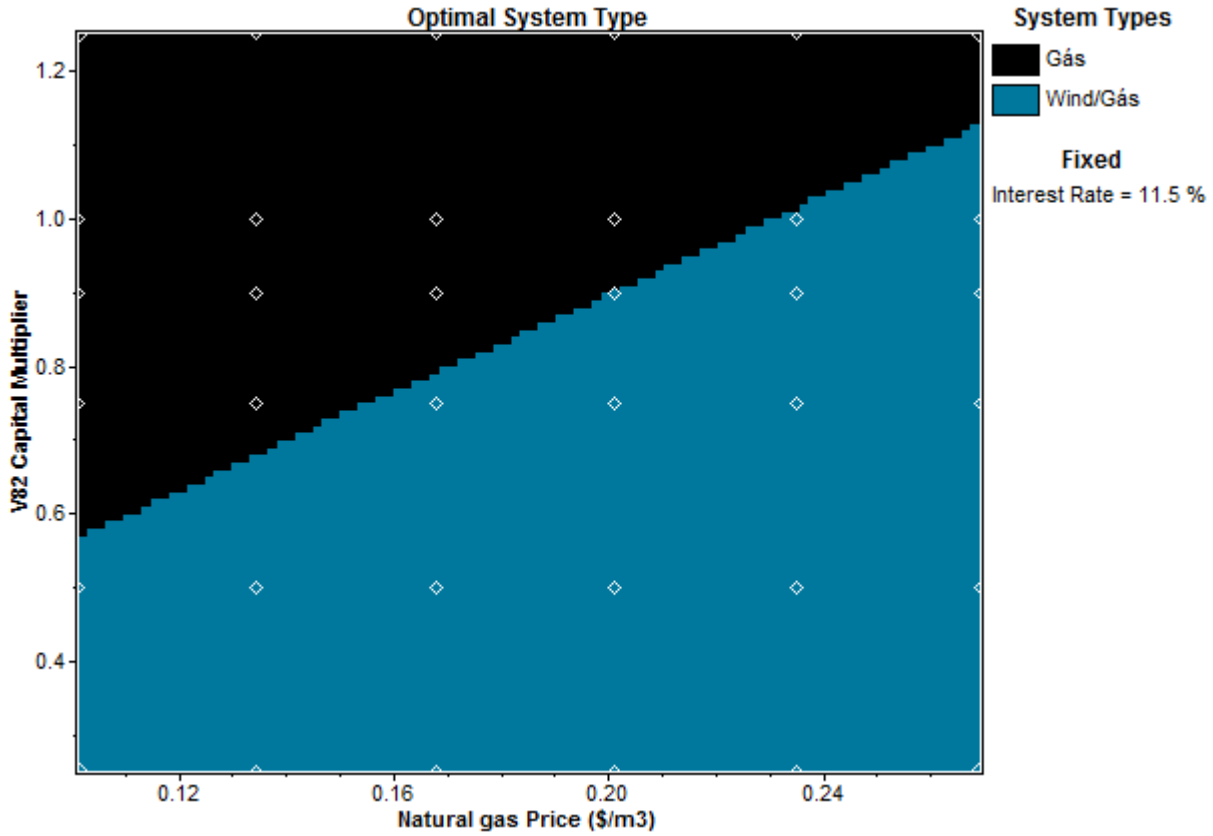


Figura 28: Sistema ótimo para taxa de juros de 11,5% ao ano.

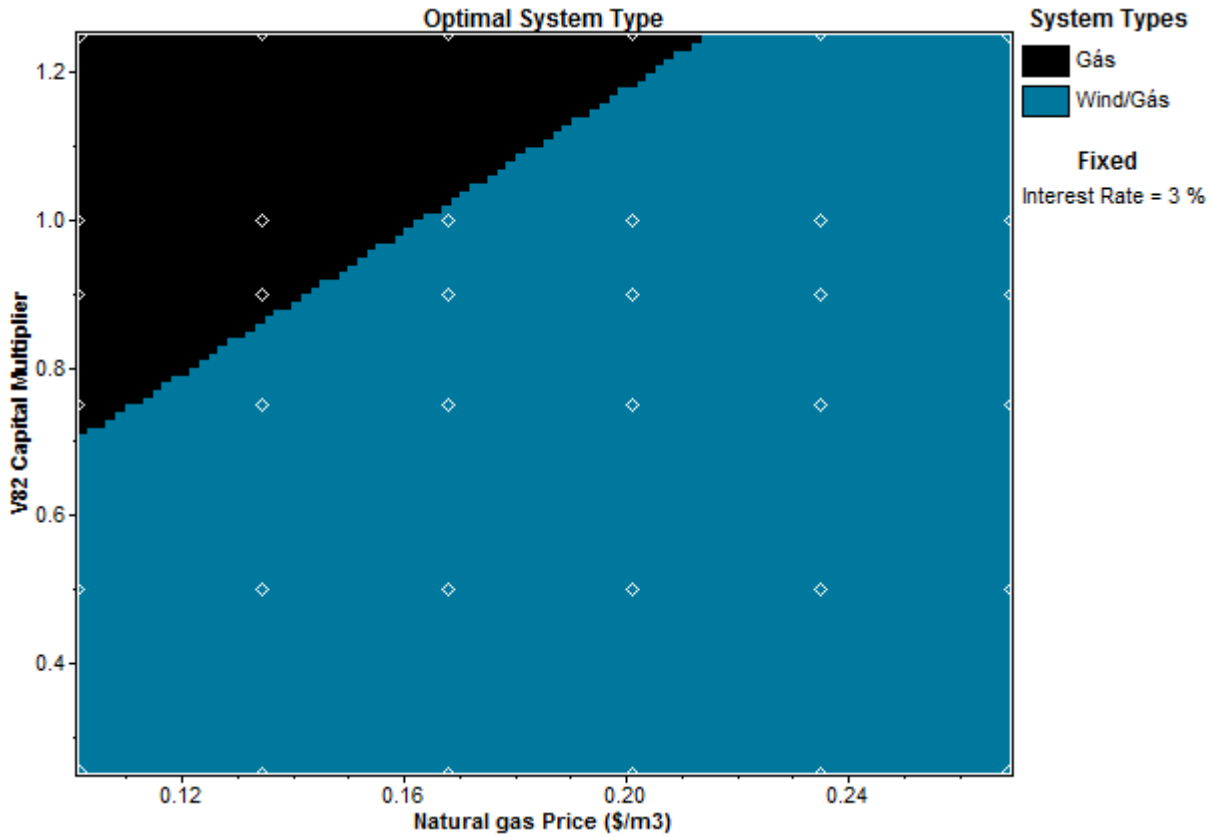


Figura 29: sistema ótimo para taxa de juros de 3% ao ano.

Uma utilidade do gráfico de sistema ótimo é a visualização dos pontos onde uma determinada forma de geração iguala o seu preço e se torna tão viável quanto outra. Na área azul do gráfico tem-se como característica a necessidade de utilização de pelo menos uma central geradora eólica no sistema para obter o menor custo de geração por kWh. Essa informação nos permite visualizar a viabilidade orgânica de uma determinada fonte, ou seja, sua viabilidade antes de quaisquer influências fiscais, ambientais ou sociais sendo, portanto, puramente econômica.

Outro tipo de gráfico disponibilizado são os de superfície. Estes gráficos utilizam uma legenda de cores para tornar bidimensional um sistema com três variáveis. Para as análises de sensibilidade duas dessas variáveis são consideradas, presentes nos eixos x e y, e as outras são fixas em um dos valores assumidos.

Nesse caso, um dos gráficos de maior interesse é a relação ao número de unidades eólicas instaladas. A *figura 30* mostra esses valores para o caso de juros na taxa central.

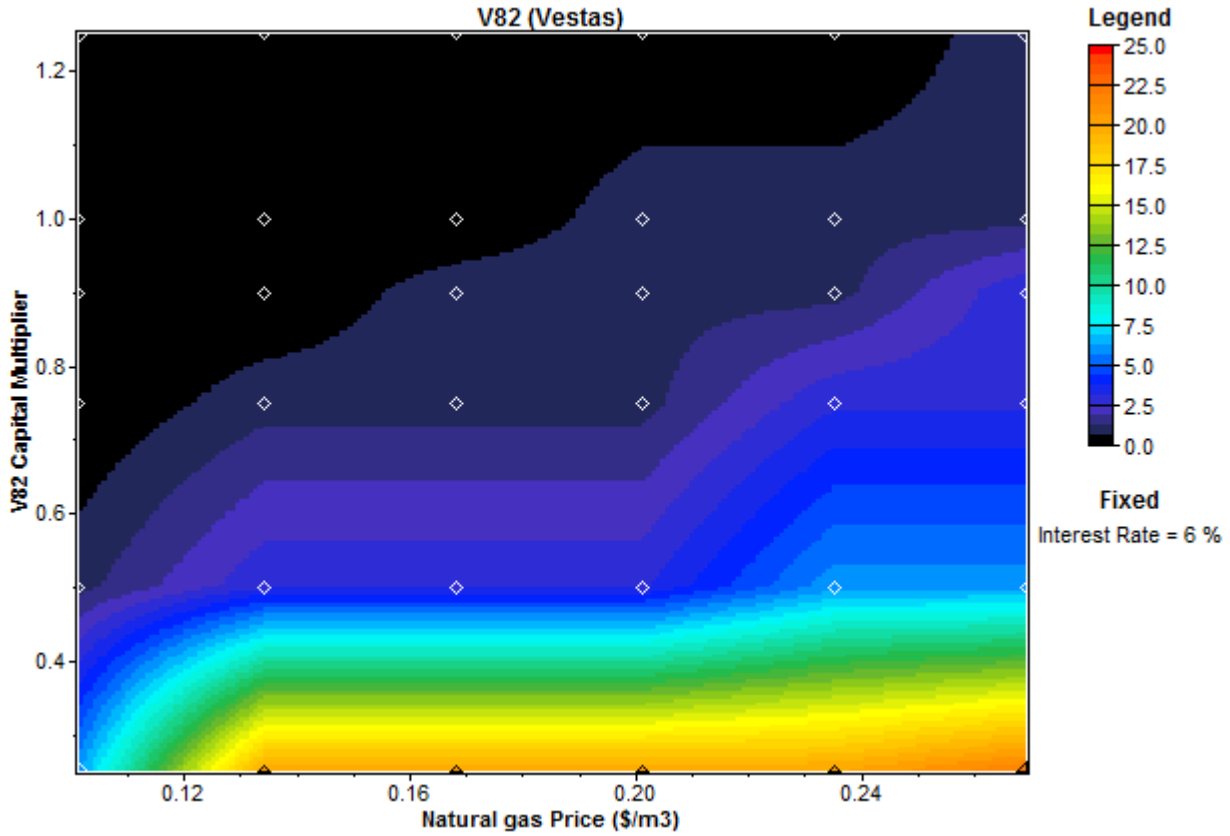


Figura 30: Quantidade se unidades V82 para juros de 6% ao ano.

Novamente é possível alterar a variável fixa e observar sua influência na forma das curvas. É interessante observar os efeitos da taxa de juros na quantidade de unidades eólicas presentes no ponto ótimo do sistema composto. As áreas mais escuras do gráfico representam uma menor quantidade de unidades eólicas, que, com o aumento do custo do gás ou a diminuição do custo total de instalação eólica, cresce. Utilizando a taxa de juros nominal o gráfico da *figura 30* transforma-se no da *figura 31*, percebe-se a diminuição no número de unidades instaladas.

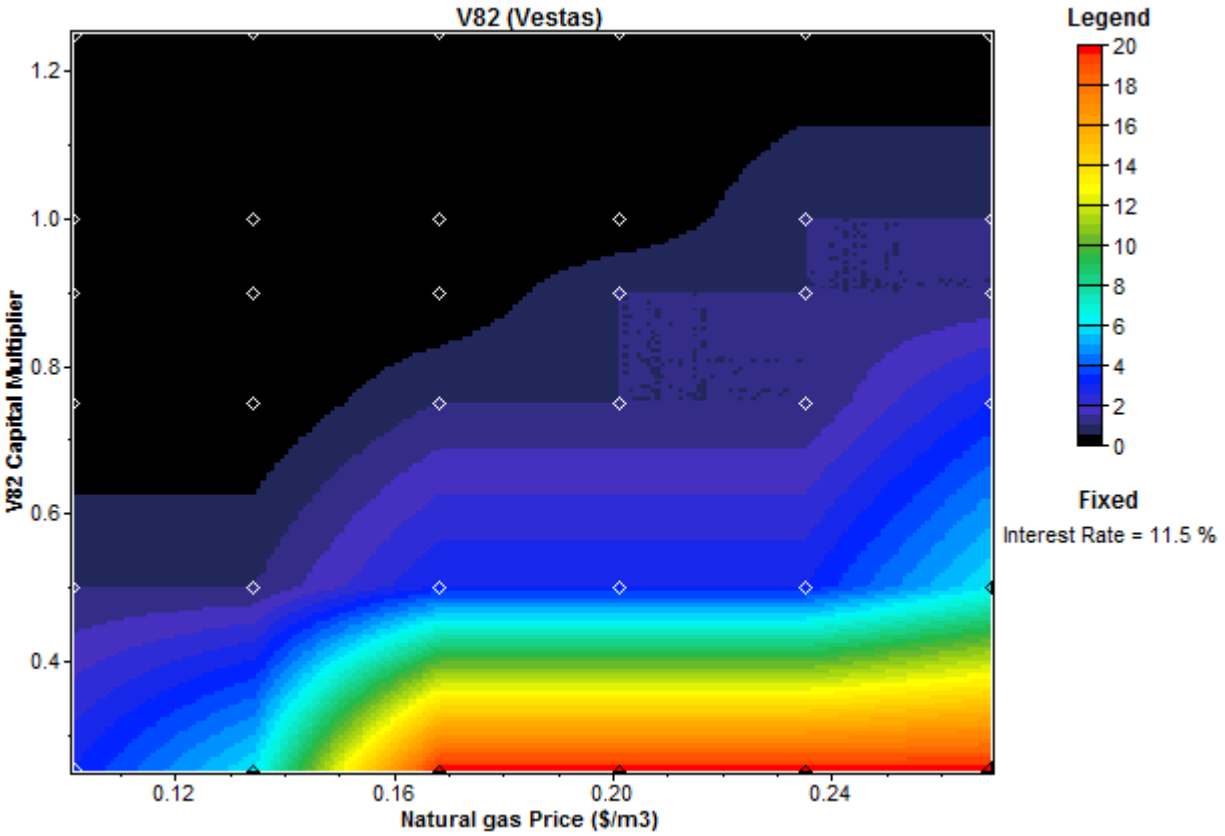


Figura 31: Quantidade de unidades V82 para juros de 11,5% ao ano.

Para uma mesma geração o efeito negativo dos juros para a energia eólica deve corresponder a um aumento na utilização de energia termelétrica, ou seja, para o gerador a gás o efeito dos juros é o oposto do que ocorre com a eólica. O escurecimento do gráfico 31 com relação ao 30 representa uma diminuição de geração eólica, note que os limites da escala do segundo gráfico (31) são menores, limitados a 20 unidades eólicas. Para evitar o carregamento excessivo com gráficos, apenas os gráficos de maior significância foram adicionados.

A potência termoelétrica instalada é de grande interesse nesse sistema, uma vez que funciona como energia de suporte à geração eólica. É visível a necessidade de manutenção de um potencial térmico de retaguarda, isso deve-se à restrição de limite de falta de fornecimento. A geração a gás é mais eficiente do que a eólica ao lidar com cargas flutuantes e pode até tornar nula a falta de fornecimento. A comparação entre as *figuras 32 e 33* explicita bem este efeito de energia de suporte, pois mesmo para níveis de geração eólica superiores a 70%, o potencial instalado de gás não diminui abaixo de 57% da potencia de pico.

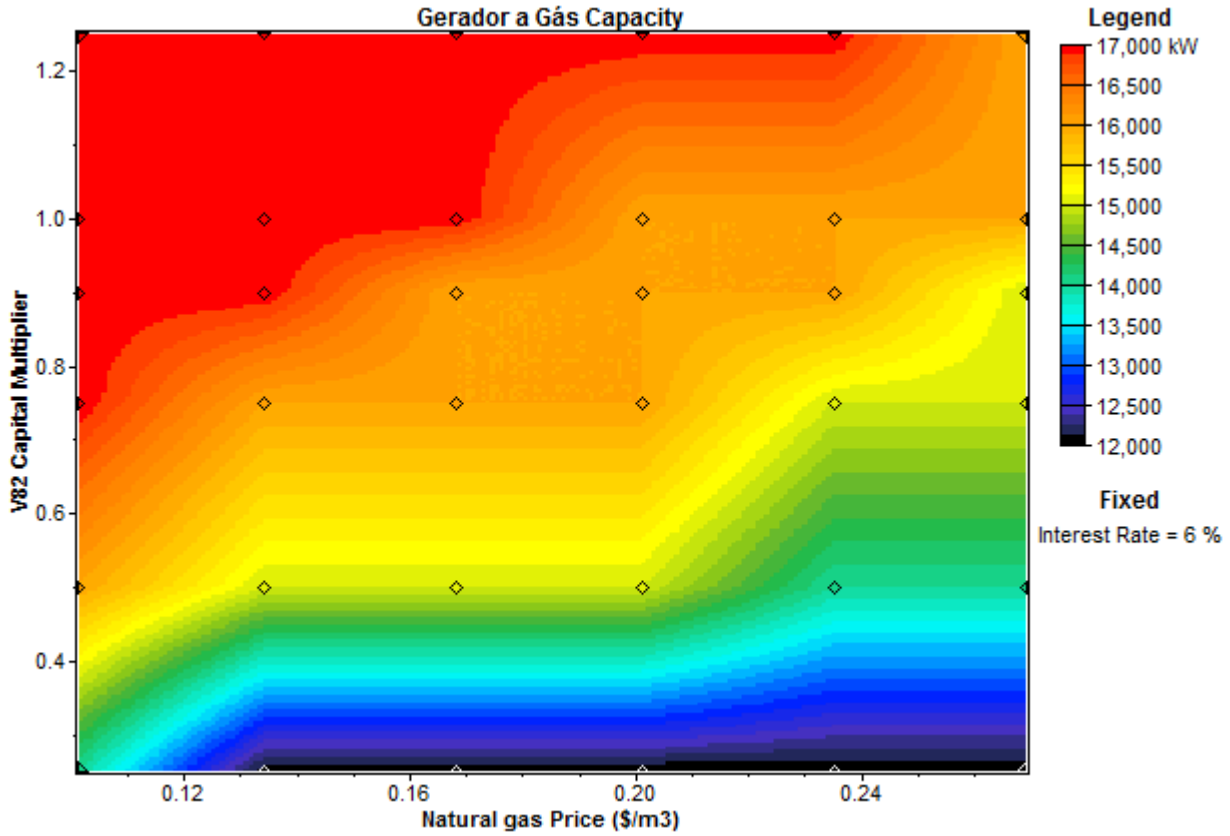


Figura 32: Potencial instalado de gás natural para a taxa de juros de 6% ao ano.

A *figura 32* ilustra uma das informações mais importantes deste trabalho, uma vez que com uma análise direta é possível inferir qual a variável de maior importância para uma alteração na matriz energética. O escurecimento do canto inferior direito representa uma menor potencia termelétrica instalada, sendo que o gráfico tem comportamento oposto ao que representa a quantidade de unidades eólicas (figuras 30 e 31).

A figura 33 mostra o percentual de variação de energia eólica (renovável) para a taxa central de juros (6%). Apesar de ser complementar à figura 33, o gráfico da figura 32 possui tem sua legenda iniciada em 12000, o menor valor que o sistema ótimo assume, enquanto o da figuras 33 começa em produção nula de energia. Mesmo com cerca de noventa por cento de produção eólica ainda é necessário uma potencia instalada de geração a gás de mais de 50% do valor de pico (12000kW para uma potencia de pico de 21000 kW)

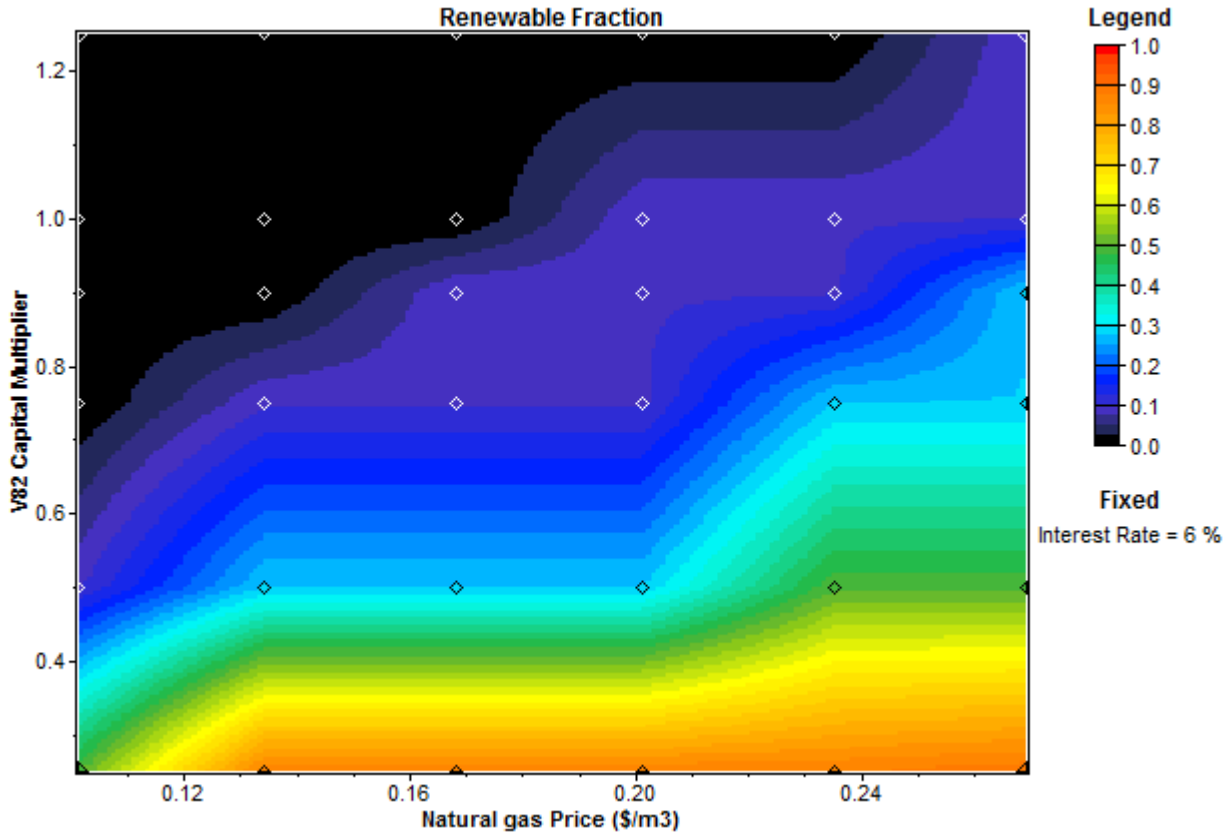


Figura 33: Geração eólica (renovável) presente no sistema com juros de 6% ao ano.

Outra superfície de interesse, *figura 34*, representa o valor excessivo de energia gerada. Apesar de ter menor importância na comparação direta de custos, este valor ilustra claramente o maior controle que se consegue ao utilizar energia obtida de geradores a gás do que para geradores eólicos. Um aumento significativo na produção eólica resulta em maior quantidade de energia, porém quando deslocada da curva de carga gera excesso. Essa energia excessiva é produzida em horários de menor demanda e neste sistema é desperdiçada. O excesso de energia é representado pelas cores mais elevadas na legenda (tons de vermelho e amarelo).

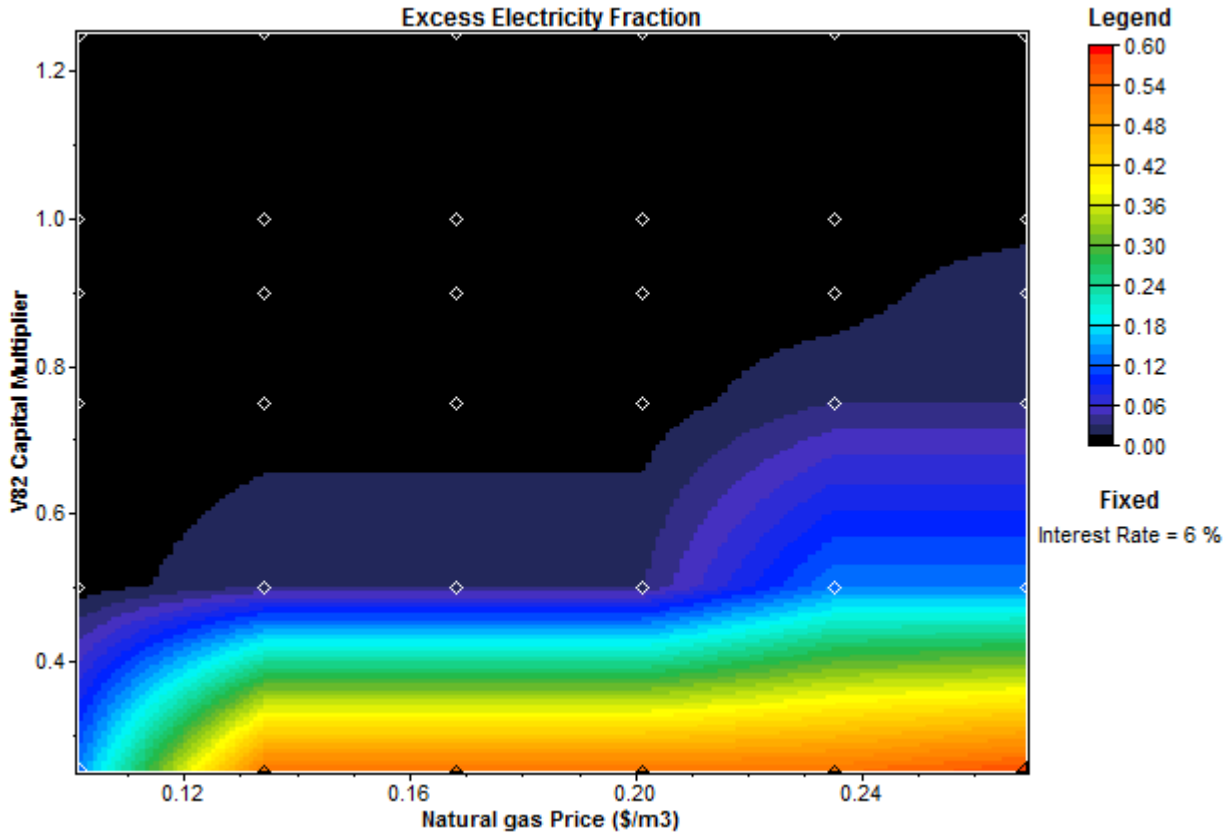


Figura 34: Parcela de eletricidade em excesso.

O excesso de energia produzido para altos níveis de geração eólica ultrapassa os 50%, figura 34. Esse valor é especialmente elevado devido ao fato da fonte de vento ser única para todas as unidades geradoras, causando coincidência de picos e vales de toda geração eólica.

4.4.2. Tabelas

Apesar da grande utilidade dos gráficos para a visualização do efeito das variáveis para o sistema com operação ótima, a informação contida neles é incompleta. Para uma análise consistente dos custos é necessário não apenas saber quais são as opções mais baratas, como também é relevante o quanto são mais baratas. Em cada iteração é realizada uma avaliação de custos completa, o que significa que o para cada conjunto de condições analisado é possível verificar o custo especifico.

O arranjo principal (com custos centrados no valor central) será analisado em detalhes. Para as outras simulações será tomado como padrão os valores centrais ou os pontos de interseção do gráfico do sistema ótimo. Isso será feito para a visualização não só para o ponto atual de operação, mas também do ponto onde uma forma de geração passa a ser competitiva. A *figura 35* mostra os diferentes valores de custo presentes no sistema com as três sensibilidades travadas em seus valores centrais.

Sensitivity variables

Natural gas Price ($/m3) 0.134 V82 Capital Multiplier 1 Interest Rate (%) 6

Double click on a system below for simulation results.

V82	Gás (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Natural gas (m3)	Gás (hrs)
	17...	$ 13,600,000	4,001,095	$ 64,747,428	0.058	0.00	0.00	25,073,...	8,759
1	16...	$ 15,770,000	3,928,119	$ 65,984,544	0.059	0.09	0.01	23,170,...	8,759
	18...	$ 14,400,000	4,135,604	$ 67,266,896	0.060	0.00	0.00	25,797,...	8,759
1	17...	$ 16,570,000	4,064,025	$ 68,521,888	0.061	0.09	0.00	23,904,...	8,759
	19...	$ 15,200,000	4,270,217	$ 69,787,704	0.062	0.00	0.00	26,522,...	8,759
2	16...	$ 18,740,000	3,999,400	$ 69,865,752	0.062	0.19	0.00	22,063,...	8,759
1	18...	$ 17,370,000	4,200,113	$ 71,061,544	0.063	0.09	0.00	24,640,...	8,759
3	15...	$ 20,910,000	3,945,507	$ 71,346,816	0.064	0.28	0.01	20,305,...	8,756
	20...	$ 16,000,000	4,405,104	$ 72,312,008	0.065	0.00	0.00	27,249,...	8,759
2	17...	$ 19,540,000	4,138,340	$ 72,441,872	0.065	0.19	0.00	22,820,...	8,759
1	19...	$ 18,170,000	4,336,867	$ 73,609,712	0.066	0.09	0.00	25,381,...	8,759
3	16...	$ 21,710,000	4,088,165	$ 73,970,472	0.066	0.27	0.00	21,090,...	8,756
2	18...	$ 20,340,000	4,278,196	$ 75,029,704	0.067	0.18	0.00	23,584,...	8,759
4	15...	$ 23,880,000	4,053,509	$ 75,697,448	0.068	0.36	0.00	19,474,...	8,753
1	20...	$ 18,970,000	4,474,474	$ 76,168,792	0.068	0.09	0.00	26,128,...	8,759
3	17...	$ 22,510,000	4,231,977	$ 76,608,872	0.068	0.27	0.00	21,883,...	8,756
	22...	$ 17,600,000	4,677,087	$ 77,388,872	0.069	0.00	0.00	28,719,...	8,759
2	19...	$ 21,140,000	4,419,361	$ 77,634,272	0.069	0.18	0.00	24,358,...	8,759
4	16...	$ 24,680,000	4,202,222	$ 78,398,496	0.070	0.35	0.00	20,304,...	8,753
3	18...	$ 23,310,000	4,377,323	$ 79,266,888	0.071	0.27	0.00	22,688,...	8,756
2	20...	$ 21,940,000	4,562,000	$ 80,257,672	0.072	0.18	0.00	25,142,...	8,759
5	15...	$ 26,850,000	4,187,444	$ 80,379,584	0.072	0.43	0.00	18,839,...	8,746
4	17...	$ 25,480,000	4,352,391	$ 81,118,168	0.072	0.35	0.00	21,145,...	8,753
1	22...	$ 20,570,000	4,753,768	$ 81,339,112	0.073	0.09	0.00	27,652,...	8,759
3	19...	$ 24,110,000	4,524,436	$ 81,947,480	0.073	0.27	0.00	23,506,...	8,756

Completed in 6:56.

Figura 35: Valores da simulação do ponto de operação atual estimado.

Os dados estão ordenados diretamente por custo de geração por kWh. Para uma análise comparativa entre as duas formas de geração de energia elétrica foram selecionados valores da tabela acima para a verificação do aumento no custo de geração devido ao aumento da quantidade de energia eólica total no sistema. Os dados foram selecionados aumentando a quantidade de eólica e verificando o custo resultante desse aumento, sendo que sempre foi escolhido o menor custo para um determinado número de unidades eólicas. A tabela 4 mostra o total de unidades geradoras, a quantidade de potencia instalada de gás natural, o custo da energia para cada arranjo por kWh e a porcentagem de energia renovável do arranjo.

Unidades Geradoras V82	Potencial instalado a gás natural (kW)	Custo de energia por kWh (U$)	Porcentagem de energia Renovável
0	17000	0,058	0
1	16000	0,059	9
2	16000	0,062	19
3	15000	0,065	28
4	15000	0,068	36
5	15000	0,072	43
6	14000	0,074	49
7	14000	0,076	54
8	14000	0,083	59
9	14000	0,087	62
10	13000	0,089	66
12	13000	0,097	72
14	13000	0,105	77
16	13000	0,112	81
18	13000	0,120	84
20	12000	0,126	87
22	12000	0,135	89
24	12000	0,144	91
26	12000	0,153	92
28	12000	0,163	93

Tabela 4: Análise do ponto de operação atual estimado.

O gráfico da *figura 36* é baseado nessa tabela (tabela 4) e ilustra a evolução do custo de energia em função da quantidade de energia eólica produzida. Devido a características técnicas da produção eólica, a potência instalada precisa ser superdimensionada para assumir grande proporção da carga, o que torna o custo incremental dessa geração maior conforme aumenta sua parcela na produção de energia.

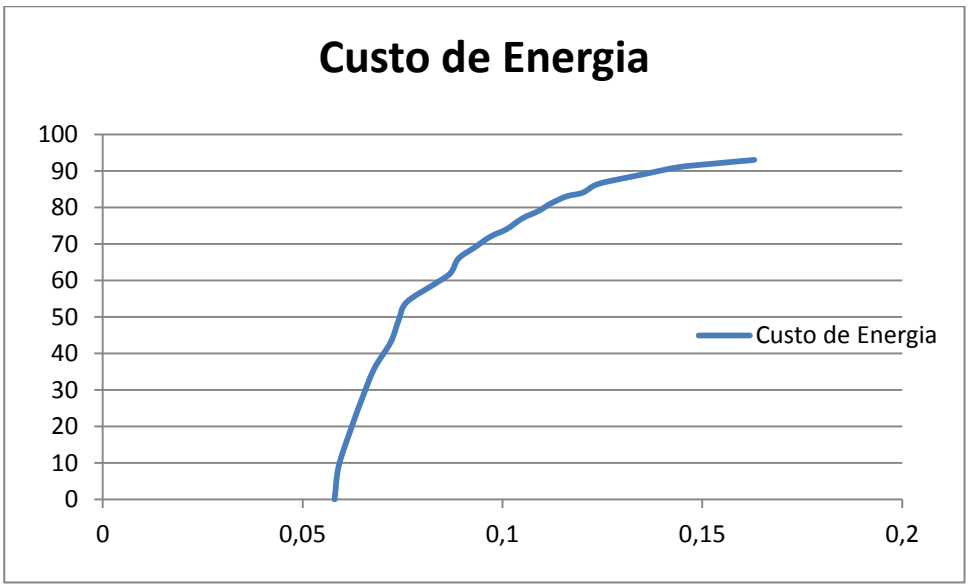


Figura 36: Custo de incremento do preço total de energia devido ao aumento de energia eólica

Esse gráfico (figura 36) ilustra o crescimento do custo incremental de produção de energia eólica.

4.4.3. Viabilidade Atual

Neste subitem é discutida a análise de viabilidade do sistema analisado.
A curva de custo de energia em função de sua participação na geração total do sistema ilustra o nível de competitividade da energia eólica. Com uma diferença de preço total de inferior a 7% é possível utilizar mais de 19% do total de energia disponível de fonte eólica. O incremento de energia eólica faz com que a energia total disponível aumente, levando a diminuição do fator de carga do gerador a gás, e aumento do custo total devido a este dimensionamento. Isso significa que o custo da energia elétrica proveniente de fontes eólicas é ligeiramente mais barato do que o descrito acima. Em um sistema com energia hidráulica de suporte, como é o brasileiro, é possível minimizar o custo desta geração, isso considerando a estratégia de despacho de energia como maximizar geração eólica.

4.5. Aplicação

O procedimento de analise será repetido com pequenas alterações para outros sistemas comparativos entre formas de geração de energia. O número de gráficos expostos foi reduzido até conter apenas as informações de maior significância. No desenvolvimento do capitulo 5 são aplicados diretamente e, apenas, no caso de procedimentos diferenciados são detalhados ao serem utilizados.

5. Resultados

Análise Eólica

Para a análise de viabilidade e custos da energia eólica foram simulados dois sistemas. O primeiro sistema é composto de uma geração eólica conectada com um gerador a gás natural. Essa ligação permite não só a visualização do custo comparativo como também a verificação quantidade de potência instalada de *back-up* necessária para que o não atendimento a cargas seja limitado a 0,5%. O segundo estudo tem como objetivo verificar a quantidade ótima, com relação ao custo, de energia eólica produzida para diferentes preços de compra de energia. Esta análise pretende comparar a competitividade desta forma de energia para um sistema mais genérico, onde a energia possui um preço determinado e os preços de diferentes geradores de energia podem ser definidos em leilões[17]. Utiliza-se nesse trabalho apenas o preço médio do MWh, sem levar em conta valores de pico.

As entradas referentes às duas simulações constam na tabela 5, nota-se que, não está definido o valor estimado central do preço de compra de energia da rede. Isso ocorre porque esse custo está sendo utilizado para o estudo do comportamento do sistema, estando o interesse exclusivamente nos extremos e na resolução da sensibilidade.

Custo	Valor Estimado Central	Valor Mínimo Assumido	Valor Máximo Assumido
Unidade Geradora a Gás	800U$/kW	1000 kW	22000 kW
Unidade Geradora Eólica	1800 U$/kW	1un. de 1650 kW	30un. de 1650kW
Preço de Compra de Energia da Rede	-	0,01U$	0,15U$
Gás Natural(m³)	0,1343U$	0,101U$	0,27U$
Juros anuais	6,00%	3,00%	De 3,00% até 12,00%

Tabela 5. Variáveis de entrada das simulações eólicas

Sistema eólico-gás

Esse sistema é explanado detalhadamente no capitulo 4. Os resultados obtidos neste sistema serão utilizados para fins de conclusivos.

Sistema eólico-rede

No sistema eólico competindo com a compra de energia da rede foi necessária a modelagem de apenas três elementos. Além das unidades geradoras foram modeladas a carga e a rede elétrica, na forma descrita no capitulo 3.

Nesse sistema as duas variáveis mais importantes são o preço de compra de energia e o custo de instalação das centrais geradoras. Ambas são variáveis de sensibilidade do sistema. O principal custo da geração eólica é o seu capital inicial, portanto o preço desse capital também requer uma análise diferenciada, sendo então a taxa de juros a terceira variável de sensibilidade. Estas variáveis assumem os valores descritos no capitulo 3.

A *figura 37* mostra as fontes que compõe o sistema ótimo em função dos custos de compra da energia e de instalação eólica com taxa de juros de 6%. A redução da taxa para 3% está representada na *figura 38* e o aumento desta taxa para 11,5% na *figura 39.*

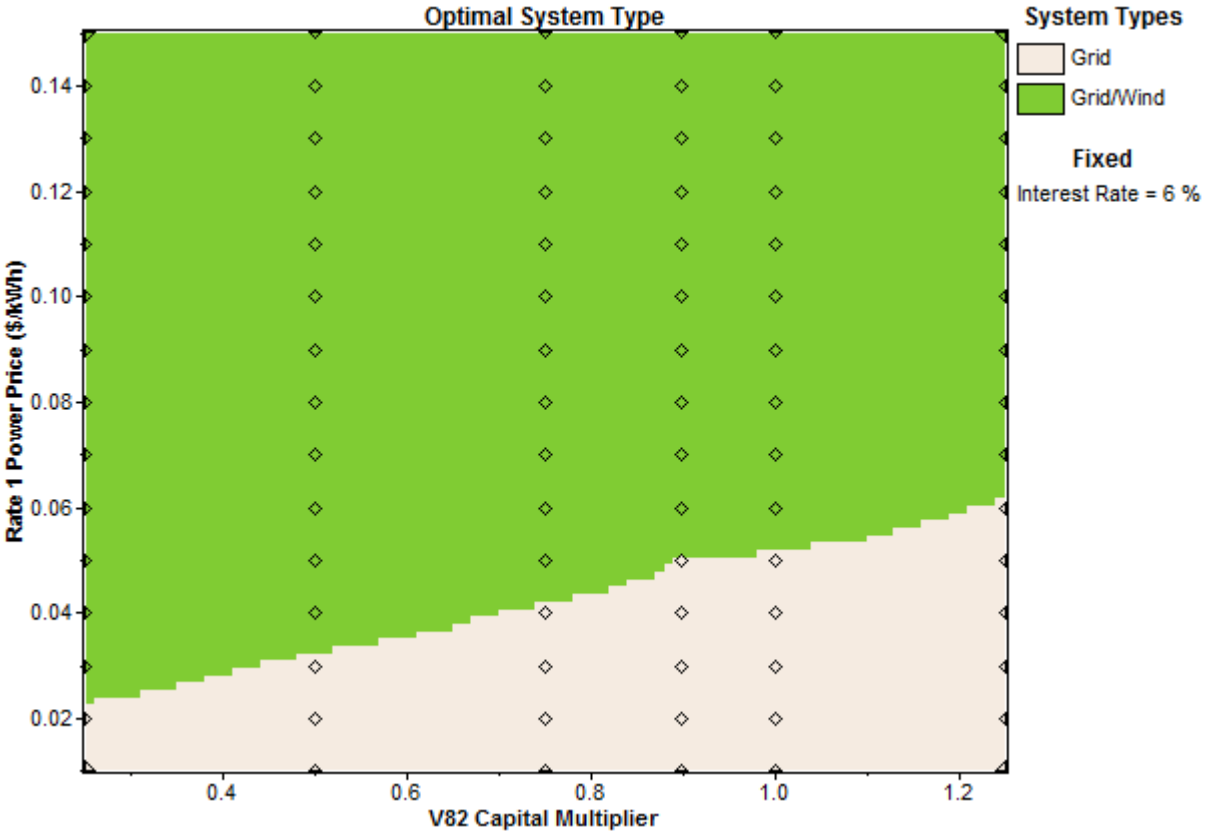


Figura 37: Sensibilidade de sistema ótimo para juros de 6%.

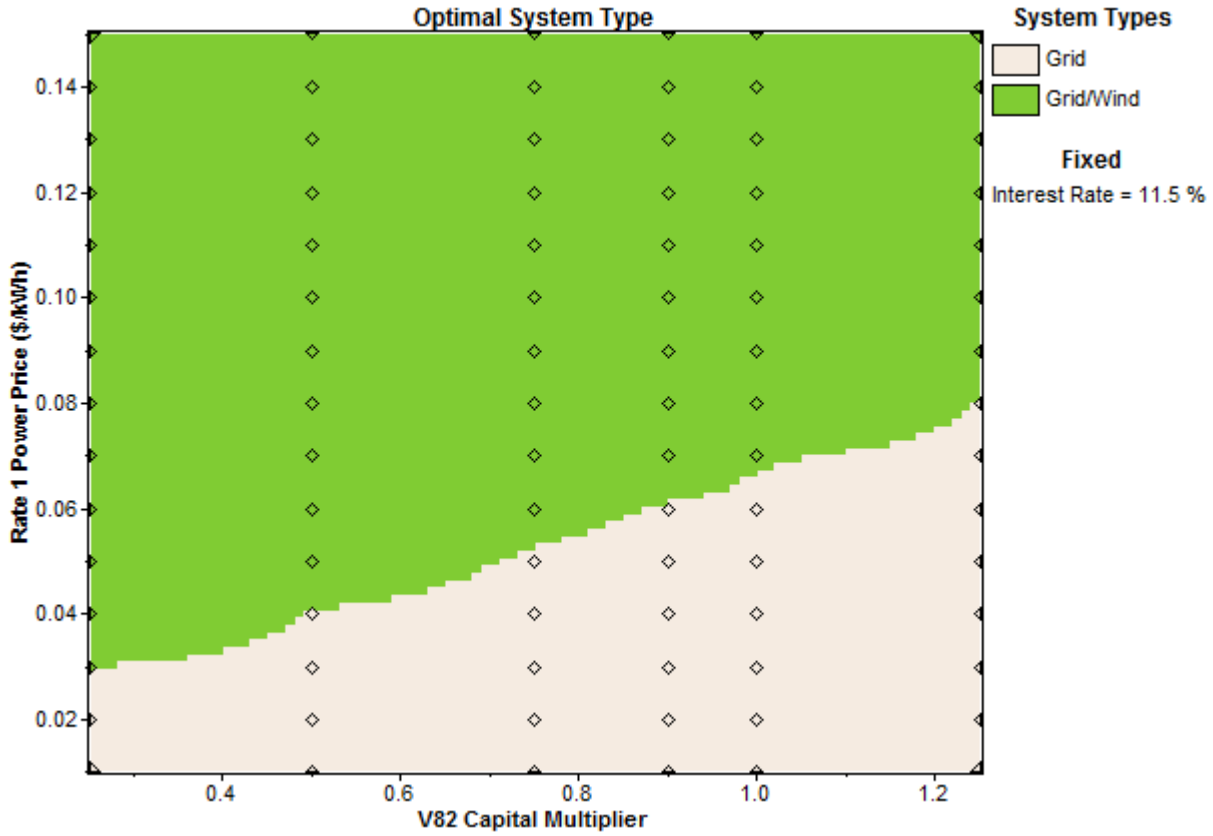


Figura 38: Sensibilidade de sistema ótimo para juros de 11,5%.

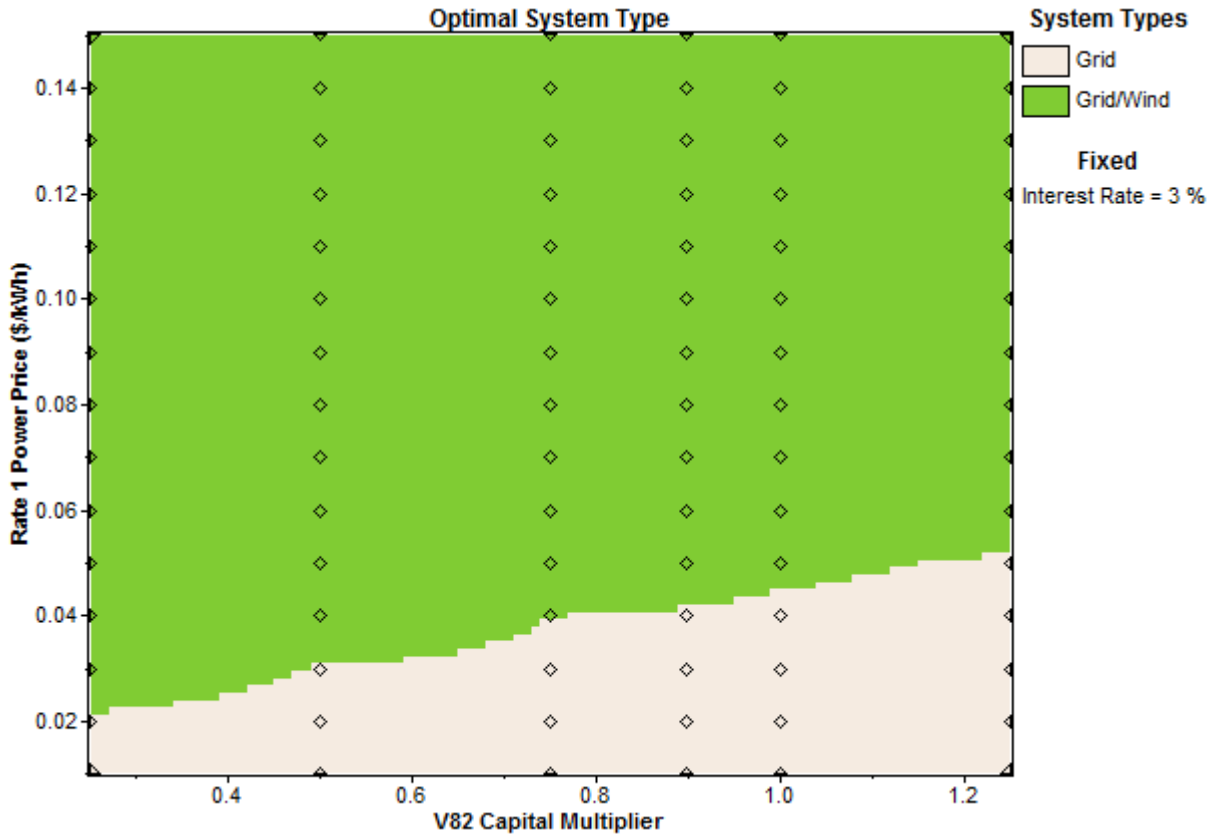


Figura 39: Sensibilidade de sistema ótimo para juros de 3%.

O número de unidades eólicas instaladas em função das sensibilidades está representado na *figura 40.* Nota-se um crescimento rápido no número de unidades instaladas a partir do ponto de viabilidade, estimado em 0,0545U$ por kW. Poder-se-ia pensar que uma vez superado este fator de custo toda energia possível seria alocada para fontes eólicas, isso, porém, não ocorre, uma vez que a partir de certo nível começa a haver desperdício de energia. As primeiras unidades eólicas alocadas fornecem energia em nível de base, ou seja, toda energia que produzem é consumida. Para suprir uma parcela maior de energia é necessário que se forneça energia intermediária, que tem demanda parcial. Como a produção eólica independe da demanda, a central poderia continuar produzindo, mas é desligada uma vez que não existem elementos armazenadores no sistema.

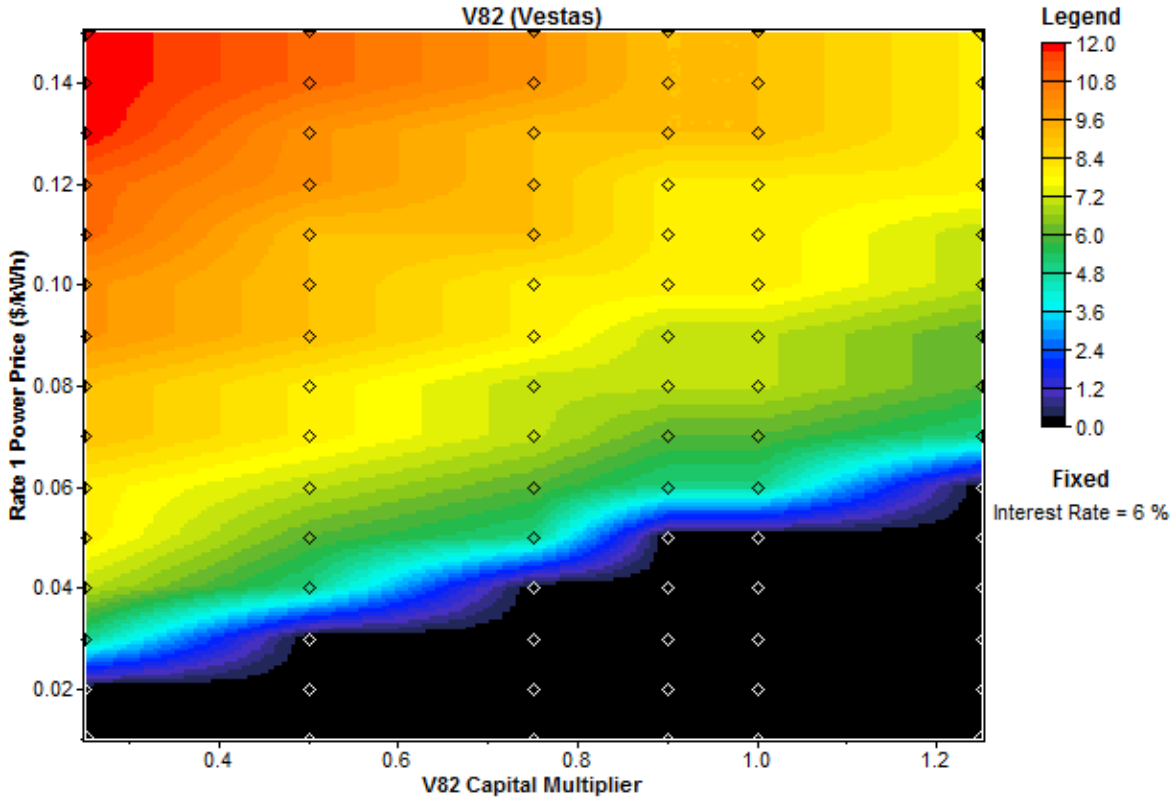


Figura 40: Quantidade de centrais geradoras eólicas para juros de 6% ao ano.

O custo total de compra de energia da rede está representado na *figura 41*. Pode-se pontuar que o incremento não é linear, o que se deve a entrada de geradores eólicos no sistema. Caso a energia fosse comprada diretamente da rede, as linhas de mudança de cor seriam todas paralelas. A entrada de unidades eólicas faz com que o gráfico assuma uma forma mais complexa. A reentrância de cores mais elevadas na escala presente na metade inferior do gráfico marca o custo total da energia imediatamente antes da entrada da geração eólica, pois essa, nessas condições, gera uma diminuição no custo de compra da energia da rede, retardando o efeito do aumento de seus custos e abaixando a escala de cores logo acima desta região.

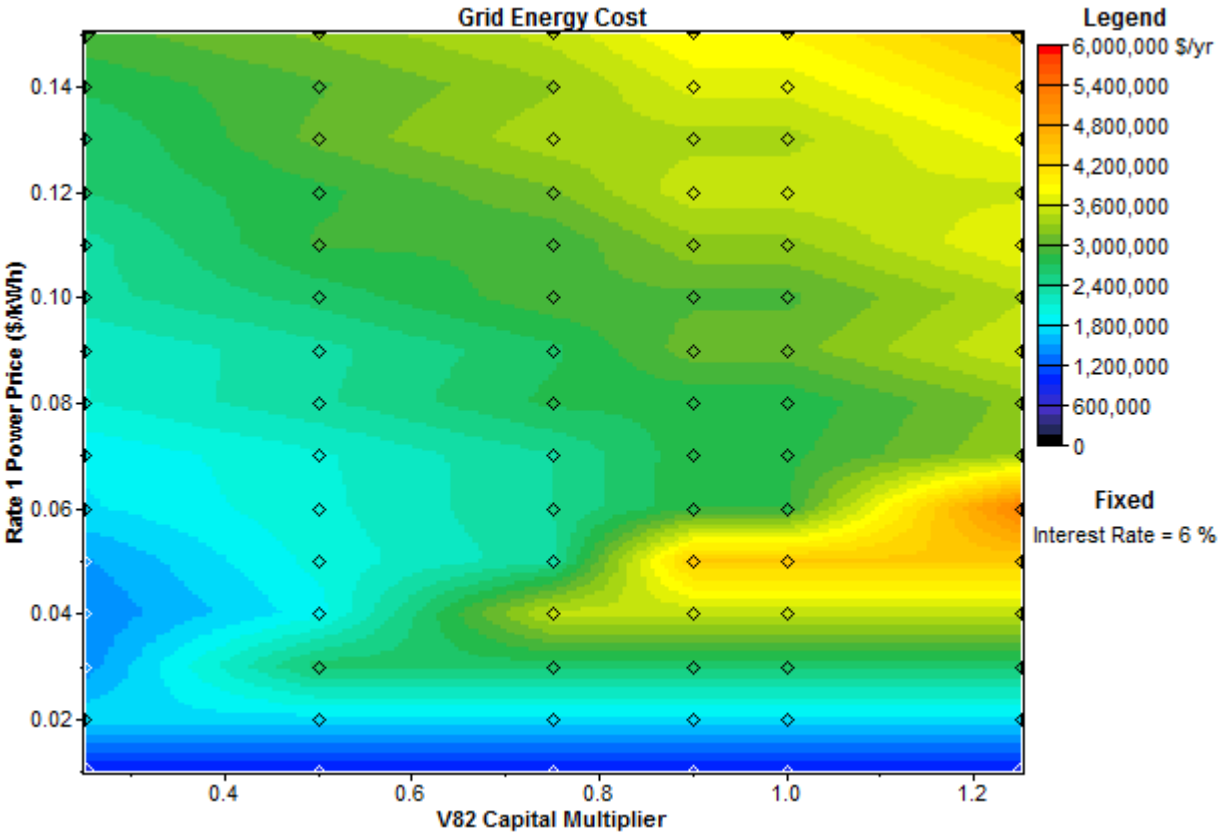


Figura 41: Custo total de compra de energia da rede para juros anuais de 6%.

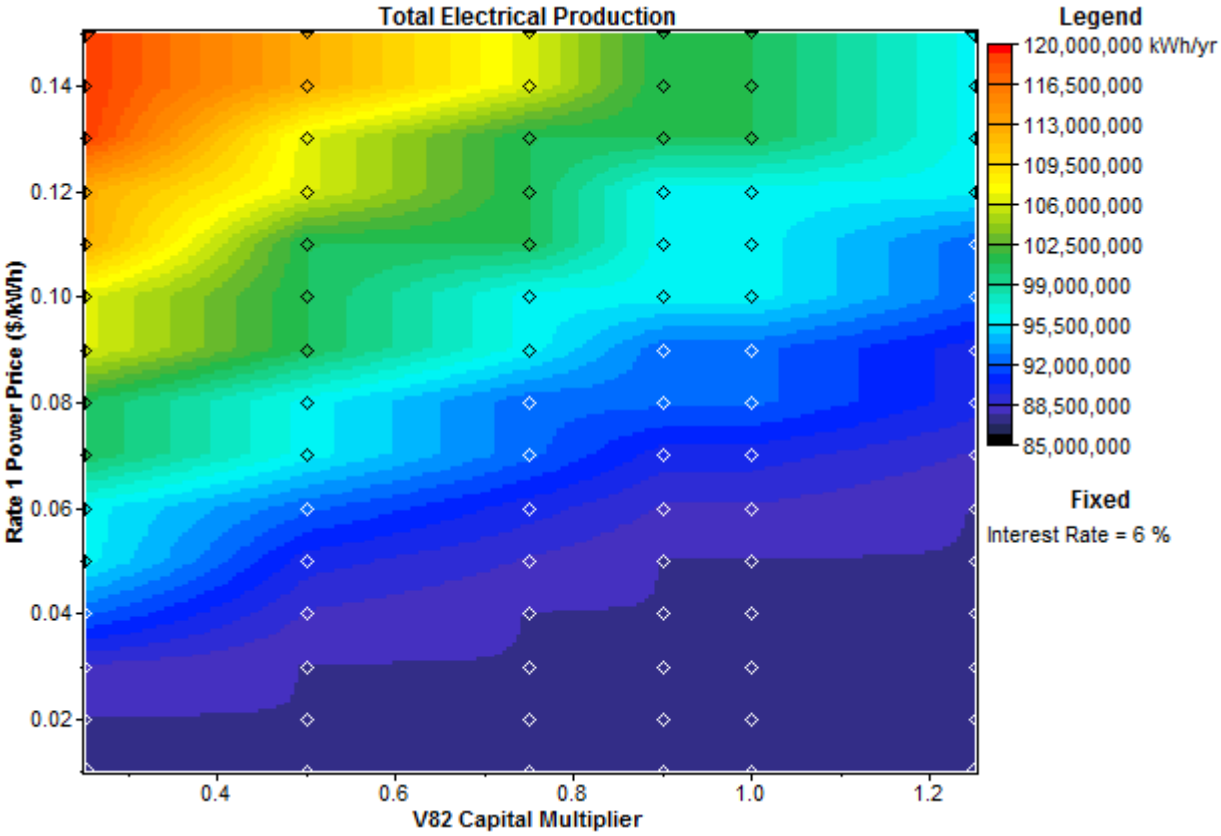


Figura 42: Eletricidade elétrica total produzida para juros de 6% ao ano.

A eletricidade total produzida está ilustrada na *figura 42* e é crescente com o aumento da produção eólica, causada tanto pelo aumento de custo da energia da rede, quanto pela diminuição dos custos de instalações eólica. Para efeitos de cálculo o *software* considera a energia produzida em excesso como se fosse vendida a custo zero. O aumento ilustrado se deve ao desperdício de potencial das eólicas e chega a níveis superiores a 30%.

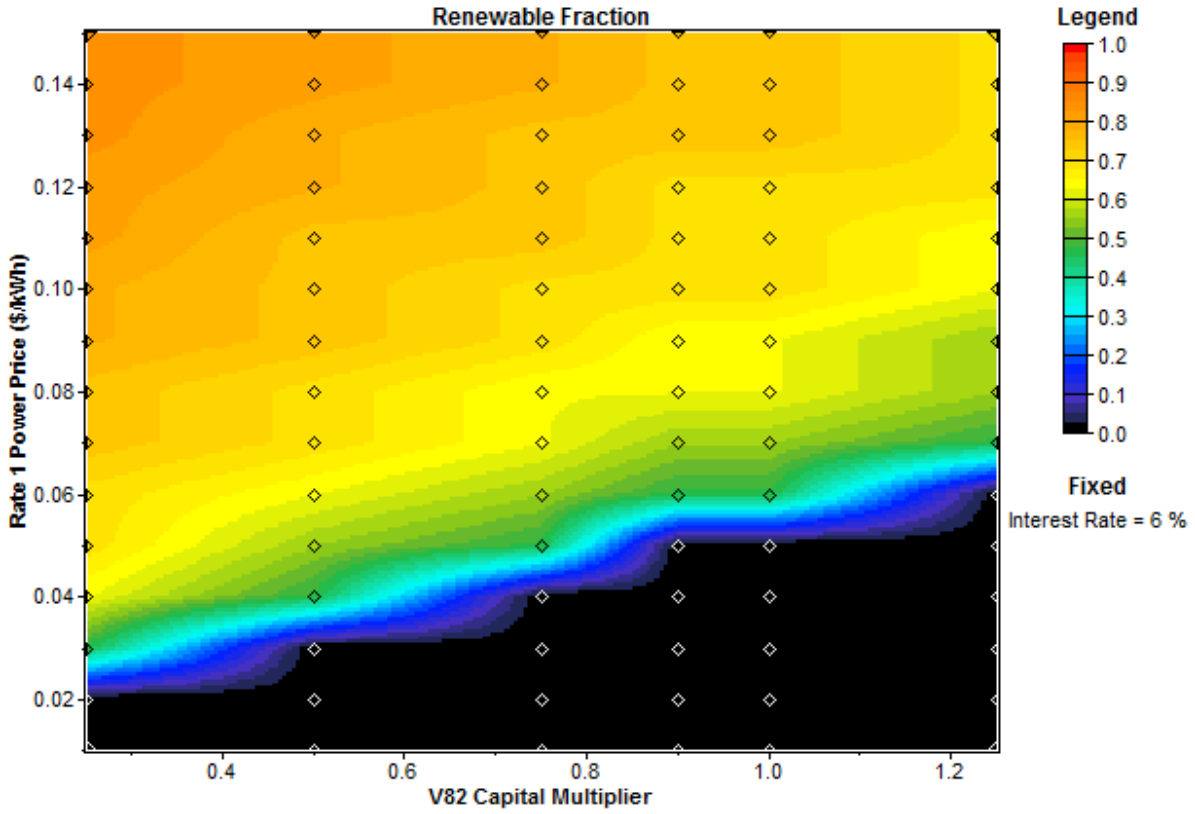


Figura 43: Parcela de energia renovável produzida para juros de 6% ao ano.

A figura 44 mostra a evolução na quantidade de unidades eólicas no sistema ótimo e o custo total da energia por kW devido ao custo de compra de energia da rede. Observa-se uma diminuição no coeficiente angular da reta de custo total de energia devido à entrada de geração eólica no sistema. A partir do custo de 6 centavos de dólar o kW a energia eólica contribui para a redução de custo de energia do sistema. A produção de energia eólica de acordo com o preço de compra da rede está na tabela 6.

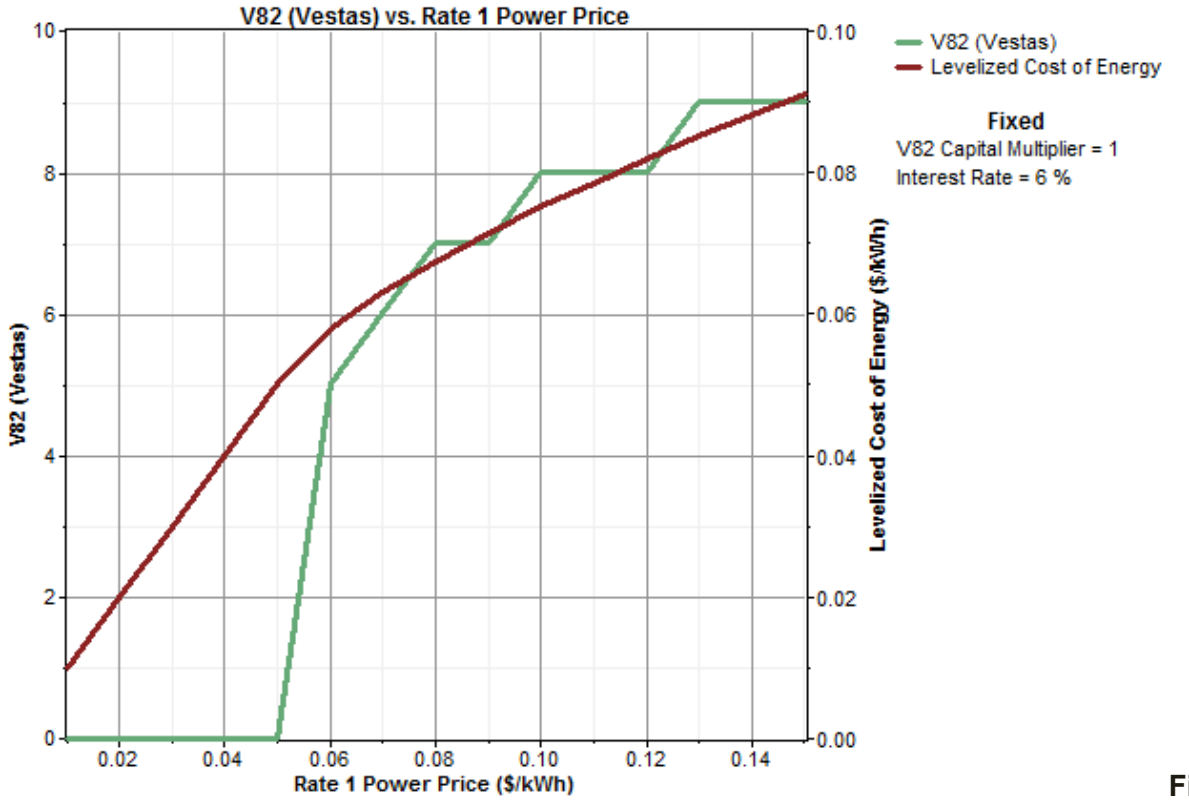


Figura 44: Número de unidades geradoras eólicas e custo da energia por kW no sistema em função do preço de compra da energia da rede para uma taxa anual de juros de 6%.

Unidades Geradoras V82	Preço da energia da rede (U$/kWh)	Custo de energia por kWh (U$)	Porcentagem de energia renovável
0	0,05	0,05	0
5	0,06	0,058	47
6	0,07	0,063	55
7	0,08	0,067	63
7	0,09	0,071	63
8	0,10	0,075	69
8	0,11	0,079	69
8	0,12	0,082	69
9	0,13	0,085	74
9	0,14	0,088	74
9	0,15	0,091	74

Tabela 6. Quantidade de unidades eólicas, proporção de geração e custos de energia.

Um conjunto de simulações digno de nota é o que utiliza juros de 6%, multiplicador de custo de instalação unitário, e preço de compra de energia da rede em 0,08U$. A venda de energia eólica no leilão do dia 17 de agosto de 2011[17] fechou com média de preço em 148,39U$ por kW,

aproximadamente 0,084U$/kW, e menor preço em 131,00U$ por kW, resultando em 0,08U$/kW. Esse dado em conjunto com o atual estado de custo, 6% de juros e multiplicador unitário, permite estimar a viabilidade de venda de energia eólica para o sistema.

Sensitivity variables

V82 Capital Multiplier 1 | Rate 1 Power Price ($/kWh) 0.08 | Interest Rate (%) 6

Double click on a system below for simulation results.

V82	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage
7	1000...	$ 20,790,000	4,278,809	$ 75,487,536	0.067	0.63	0.00
6	1000...	$ 17,820,000	4,523,964	$ 75,651,440	0.068	0.55	0.00
8	1000...	$ 23,760,000	4,130,105	$ 76,556,608	0.068	0.69	0.00
5	1000...	$ 14,850,000	4,857,175	$ 76,941,000	0.069	0.47	0.00
9	1000...	$ 26,730,000	4,069,527	$ 78,752,216	0.070	0.74	0.00
4	1000...	$ 11,880,000	5,252,897	$ 79,029,656	0.071	0.38	0.00
3	1000...	$ 8,910,000	5,680,824	$ 81,529,992	0.073	0.28	0.00
10	1000...	$ 29,700,000	4,074,056	$ 81,780,104	0.073	0.78	0.00
2	1000...	$ 5,940,000	6,121,421	$ 84,192,304	0.075	0.19	0.00
11	1000...	$ 32,670,000	4,122,029	$ 85,363,368	0.076	0.81	0.00
1	1000...	$ 2,970,000	6,564,475	$ 86,886,024	0.078	0.09	0.00
12	1000...	$ 35,640,000	4,204,455	$ 89,387,048	0.080	0.84	0.00
	1000...	$ 0	7,007,986	$ 89,585,584	0.080	0.00	0.00
13	1000...	$ 38,610,000	4,312,234	$ 93,734,816	0.084	0.86	0.00

Figura 45: Simulação nas condições próximas as atuais de operação do sistema.

Viabilidade atual

Os dados descritos nessa iteração, tabela 6, indicam um total de energia eólica de 63% do total do sistema com 7 unidades no ponto ótimo e custo de 0,067U$. Pode-se inserir, teoricamente, até 12 unidades com parcela de geração de 84% sem superar o custo de 0,08. Esse valor final desconsidera custos de projeto, ligação à rede de transmissão (varia de um custo praticamente desprezível até um custo inibidor dependendo da localidade) e expectativa de retorno de capital, mas mostra a viabilidade, com espaço para lucratividade de até 30% sobre o valor de custo, desta geração já nas condições atuais de mercado.

Análise Solar

Para a verificação de viabilidade de geração solar fotovoltaica foram realizados os mesmos testes da energia eólica. A inclusão de energia fotovoltaica em um sistema faz com que o número de variáveis analisadas cresça de forma significativa, pois além de inserir variáveis referentes aos painéis, inserem-se mais dois elementos, as baterias e inversores.

A quantidade de números de painéis a serem considerados, tem seu esforço computacional elevado no mínimo ao quadrado, uma vez que para cada valor de instalação é também considerado um valor de capacidade do inversor. Além disso, existem as baterias, que necessitam de diferentes bancos para melhorar a eficiência das diferentes instalações. Por haver uma limitação no número de baterias (30000), a carga considerada nessas simulações é de 1MWh em média (10% do valor original) seguindo a mesma curva descrita no capitulo 2 - devido ao pequeno degrau existente na energia fotovoltaica não há perda de precisão.

A tabela 7 mostra as quantidades consideradas. Como o valor da carga foi reajustado para um décimo do valor inicial, o gerador a gás foi alterado conforme consta na tabela abaixo.

Gerador a gás (kW)	0	100	500	1000	1500	1700	2000	-	-
Fotovoltaica (kW)	0	75	375	750	1135	1875	3500	5625	7500
Inversor (kW)	0	22	110	220	330	550	1100	1650	2200
Baterias (unidades)	0	155	775	1550	2325	3875	7750	11625	15500

Tabela 7. Quantidades utilizadas nas simulações

A quantidade máxima de painéis utilizados é baseada no menor valor instalado capaz de suprir completamente o sistema, descrito pela equação X. Esse valor foi elevado para 7500 kW (2,7% acima do calculado). Os outros valores são múltiplos dele, estabelecidos em 75%, 50%, 25%, 15%, 10%, 5% e 1%. O preço do sistema sem produção fotovoltaica é considerado.

(X) $P_{ps}=Q_{média}/(fc*\eta_{inv}\eta_{bat}) = 7.302$ kW

Sendo P_{ps} a potência fotovoltaica mínima instalada para o fornecimento completo de energia, $Q_{média}$ a potência média horária, fc o fator de carga dos painéis nas condições presentes de irradiação, η_{inv} a eficiência do inversor e η_{bat} a eficiência das baterias.

Qualquer fornecimento de geração solar responsável por um fornecimento maior do que 30% do tempo é feito através de baterias, não importando o quão superdimensionado seja o sistema (a energia solar só é aproveitável durante o dia). A quantidade máxima de baterias foi obtida através de iterações para verificar a sua menor quantidade para que a falta de energia não supere 0,5% (considerando a maior instalação), as outras quantidades são proporcionais aos valores da instalação. O valor obtido pelas iterações foi de 15500 baterias para 7500 kW, ou seja, aproximadamente 2,1 baterias por kW para suprimento quase total (0,5% de *shortage,* para nenhuma falta de fornecimento seriam necessárias mais de 24000 baterias).

Sistema solar-gás

Para variáveis de sensibilidade deste sistema foram utilizados o custo do gás natural e o multiplicador de custo de instalação dos elementos do sistema solar. A tabela 8 mostra as quantidades assumidas pelos valores de sensibilidade.

Custo do gás natural (U$/m³)	0,101	0,1343	0,168	0,201	0,235	0,269
Multiplicador do custo de instalação	1	0,5	0,25	0,1	-	-

Tabela 8. Valores assumidos pelas variáveis de sensibilidade.

Devido ao elevado custo dessa forma de energia, mesmo com o valor do gás natural duas vezes maior que o atual, a produção fotovoltaica não é competitiva, como mostra a *figura 46*. O sistema ótimo só permite a utilização de energia solar para multiplicadores de custo muito baixos.

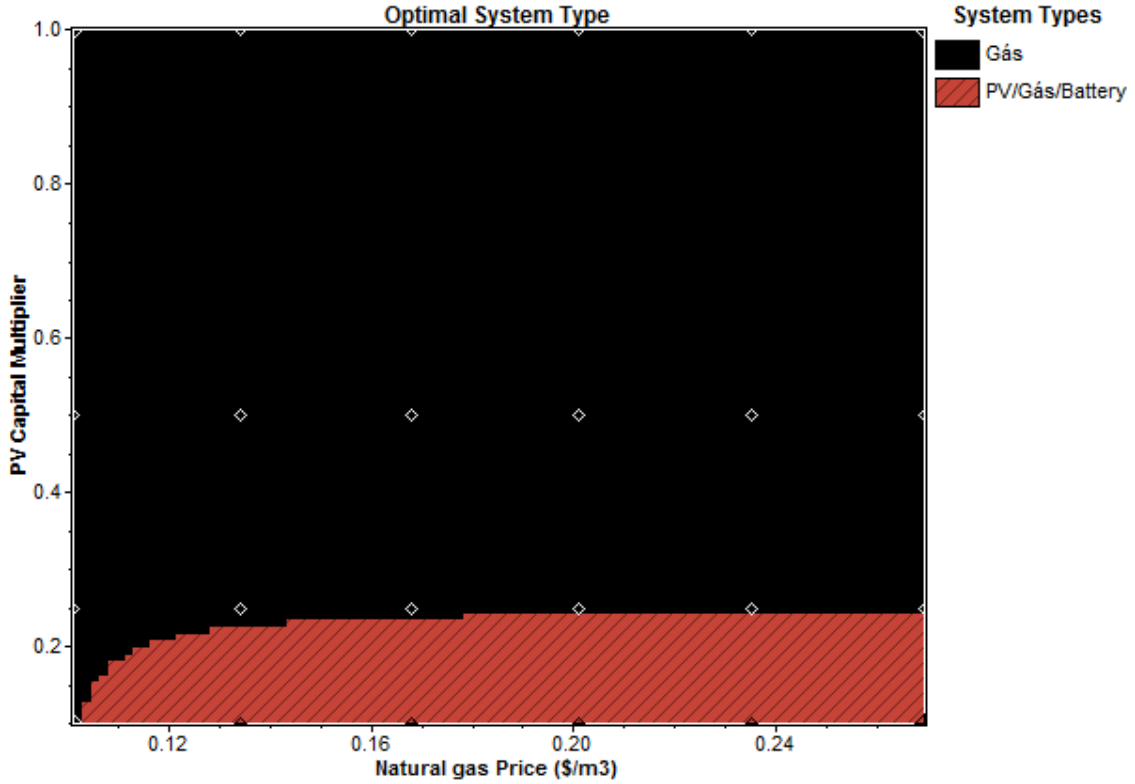


Figura 46: Tipos de sistema ótimo

Outro gráfico interessante, presente na *figura 47*, trata da quantidade de energia renovável do sistema ótimo.

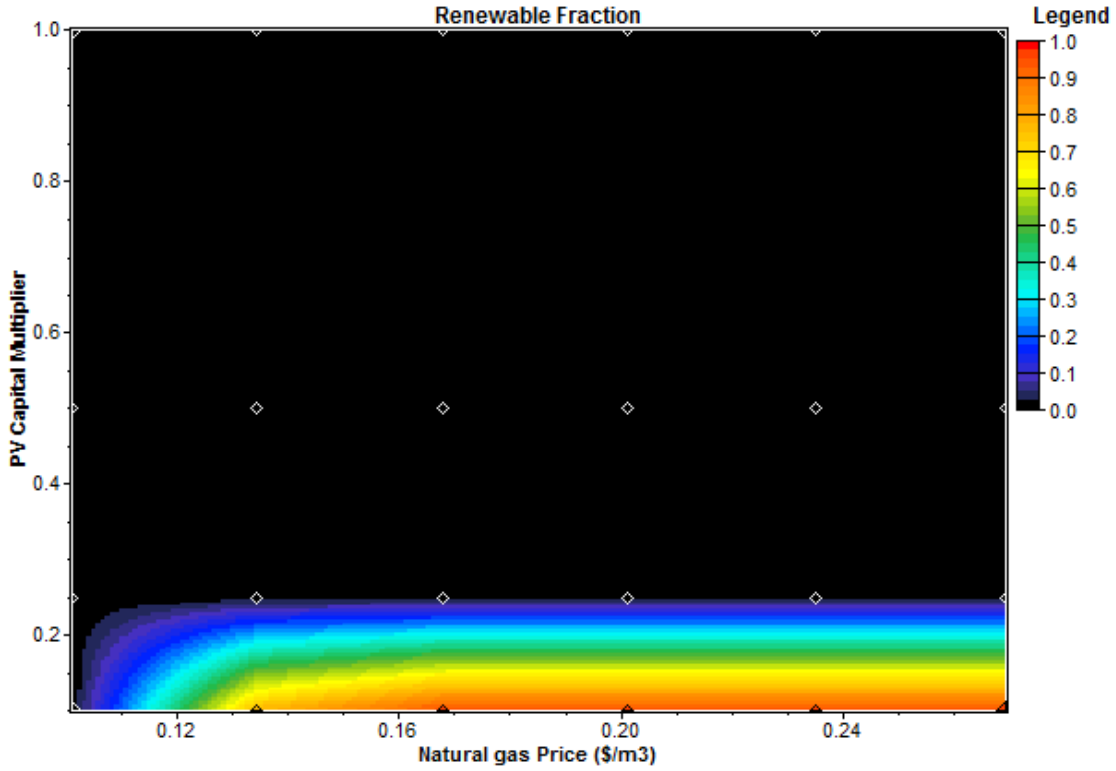


Figura 47: Fração de energia renovável presente no sistema ótimo.

A sensibilidade ao custo de instalação dos painéis é tão superior ao efeito do aumento de custo do gás natural que as linhas de ótimos são praticamente horizontais na figura 47. Por outro lado a diminuição do preço do gás causa um efeito considerável na diminuição de utilização fotovoltaica, praticamente extinguindo-a (notável no canto inferior esquerdo do gráfico).

Os outros gráficos de superfície são de pouco interesse, uma vez que, além do nível tecnológico necessário para a redução de custo, até a competitividade dessa forma de energia, estar distante, todos mostram o mesmo tipo de independência ao aumento do custo do gás.

A análise na qual existe maior interesse é a verificação do aumento incremental do custo total da energia com o acréscimo de geração fotovoltaica. Se devido a incentivos ou políticas esta forma de energia for levada a ocupar um lugar de maior destaque na matriz energética, quanto seria seu custo? Esse procedimento de incentivo já é comum para a geração eólica, não por cotas, mas por linhas de crédito e auxílios de custo provenientes de outras formas de geração.

A tabela 8 abaixo ilustra os custos mínimos necessários para se obter diferentes níveis de geração fotovoltaica nas condições atuais. Diferenças inferiores a 5% foram descartadas.

Potencial fotovoltaico instalado (kW)	Capacidade do Inversor (kW)	Hoppecke 24 OPzS 4340 (unidades)	Potencial a gás natural instalado (kW)	Custo de energia por kWh (U$)	Porcentagem de energia renovável (%)
0	0	0	1700	0,058	0
75	22	0	1700	0,061	1,23
375	110	0	1700	0,073	5,85
750	220	0	1700	0,087	11,1
1125	330	0	1700	0,103	15,7
1875	1650	155	1700	0,132	24
1875	2200	3875	1700	0,178	30
3750	2200	155	1700	0,198	48
5625	1650	155	1700	0,272	60
5625	2200	775	1500	0,274	64
7500	1650	155	1700	0,342	67
7500	2200	775	1500	0,346	71
7500	1000	11625	1000	0,474	87

Tabela 9. Evolução do custo total da energia com relação à proporção de geração fotovoltaica.

O gráfico da *figura 48* ilustra o incremento do custo total do sistema com relação ao crescimento da parcela de energia solar.

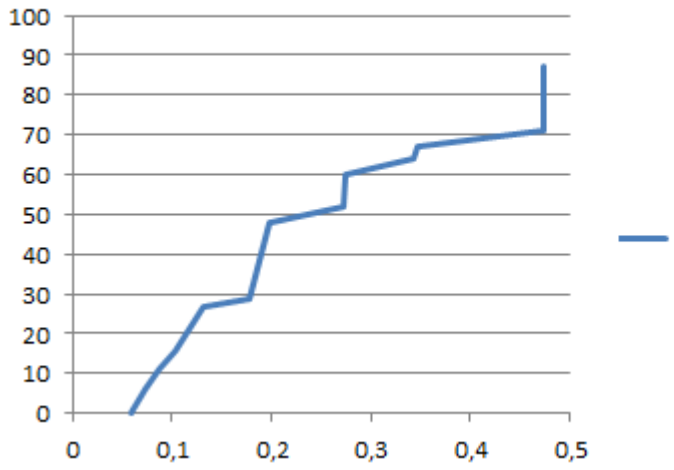


Figura 48: Custo de energia (U$/kW) em função do crescimento da parcela fotovoltaica (%).

Viabilidade atual

A menos que haja uma redução de mais de 70% no custo total de instalação dos componentes de geração fotovoltaico, esta forma de geração não é competitiva. Se houver acesso a geração proveniente de gás natural, sob quaisquer razoáveis, essa é mais viável.

Sistema solar-rede

O sistema solar rede foi simulado utilizando as mesmas variáveis de entrada do sistema solar gás, apenas retirou-se o gerador e inseriu-se a rede elétrica. O preço de compra de energia da rede nesse sistema tem seus valores em: 0,06; 0,10; 0,20; 0.25; 0,30; 0,325; 0,35; 0,375; 0,4; 0,45 e 0,5 U$. Foi necessário um aumento considerável nos custos de venda de energia para a verificação da viabilidade de custos do sistema solar. *A figura 49* mostra o sistema ótimo em função do preço de venda da energia solar

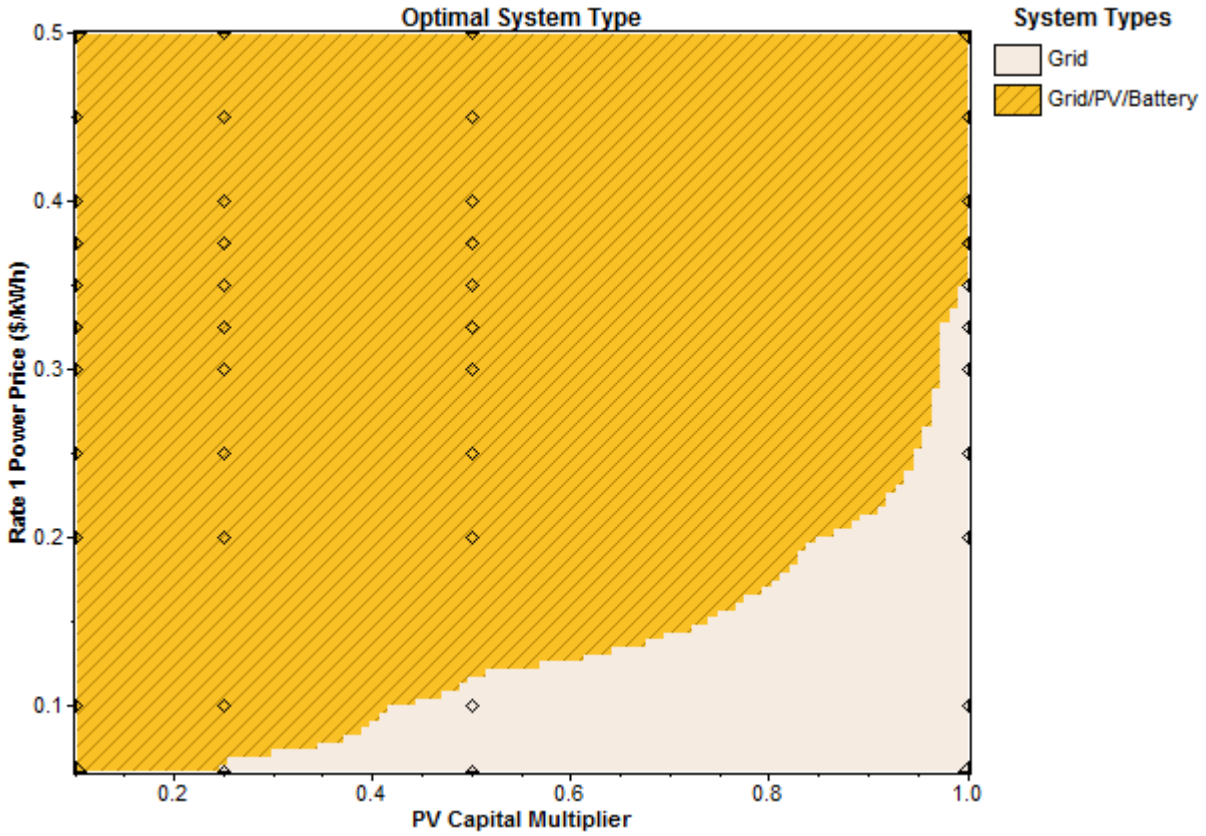


Figura 49: Tipo de sistema ótimo em função das sensibilidades

O preço mínimo de energia da rede necessário para a viabilidade da geração fotovoltaica nas condições atuais, extrema direita da *figura 49*, é ligeiramente superior a 0,35 U$ o kW. É

interessante ressaltar o fato de ser necessária uma redução de 70% no custo de instalação para que seja competitiva a energia fotovoltaica.

A *figura 50* mostra a quantidade de energia solar presente no ponto ótimo de operação. Uma vez que se torne viável a geração com utilização de baterias, a energia fotovoltaica pode fornecer potência para a carga em qualquer instante, assumindo então rapidamente uma grande parcela da carga. No gráfico isto se torna visível pela deformação próxima a marcação de 0.5 na escala no canto esquerdo.

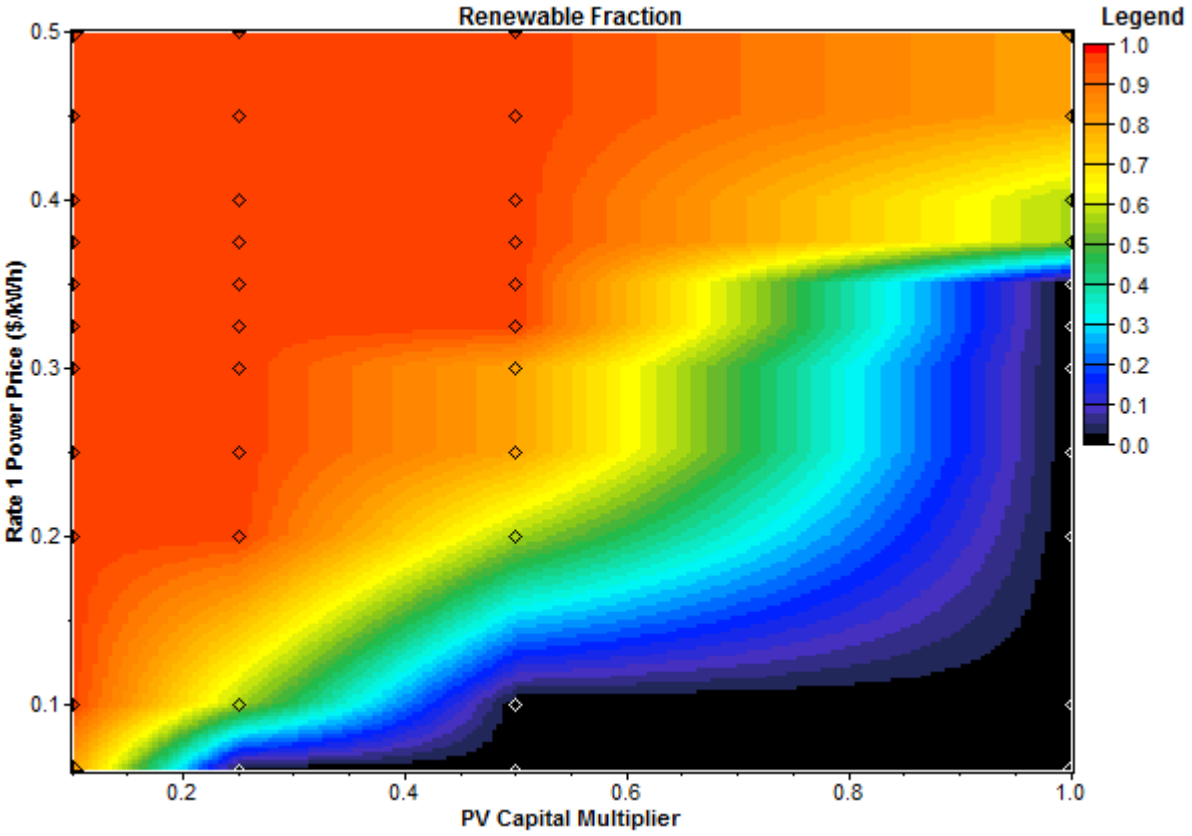


Figura 50: Fração de geração solar no sistema ótimo.

A tabela 9 mostra o crescimento da quantidade de energia viável através de produção fotovoltaica em relação ao custo de compra de energia da rede.

Custo de compra de energia da rede	Potência Fotovoltaica ótima instalada	Custo final de energia	Porcentagem de produção fotovoltaica
0,06	0	0,06	0
0,10	0	0,10	0
0,20	0	0,20	0
0,25	0	0,25	0
0,30	0	0,30	0
0,325	0	0,325	0
0,35	0	0,35	0
0,375	3750	0,365	56
0,40	3750	0,365	56
0,45	5625	0,398	80
0,5	5625	0,41	80

Tabela 9. Proporção de energia fotovoltaica produzida em função do preço de compra de energia da rede.

Viabilidade Atual

Está forma de energia é inviável para a aplicação em larga escala. O custo atual de compra da eólica (no último leilão de energia), já subsidiado, é mais de quatro vezes menor que o custo mais baixo onde esta produção é viável. Esta forma é hoje mais poluente que a geração eólica devido aos gastos de energia para sua produção e aos componentes nocivos utilizado nesse processo.
Este alto custo, porém, não elimina sua aplicação de geração para cargas isoladas. O custo de conexão de cargas isoladas à rede elétrica é bastante elevado, podendo se utilizar a geração fotovoltaica para eliminar a necessidade dessa ligação. A maior qualidade da geração fotovoltaica está em sua disponibilidade global e possibilidade de suprimento em pequena escala.

Análise Hidrelétrica

A análise hidrelétrica difere-se das outras por se tratar de uma fonte onde o principal limitante é o recurso hídrico e não o capital. Inicialmente foi considerada uma fonte capaz de suprir completamente a carga para visualizar o seu limiar de viabilidade. A *figura 51* mostra a utilização de energia hidrelétrica com relação as variáveis de sensibilidade, para o ponto onde sistema é mais barato. É notável o fato dessa forma de energia renovável ter um custo inferior à metade do

necessário para estar no mesmo patamar de custo que geração em maior expansão no país. O ponto atual de operação do sistema é o inferior esquerdo.

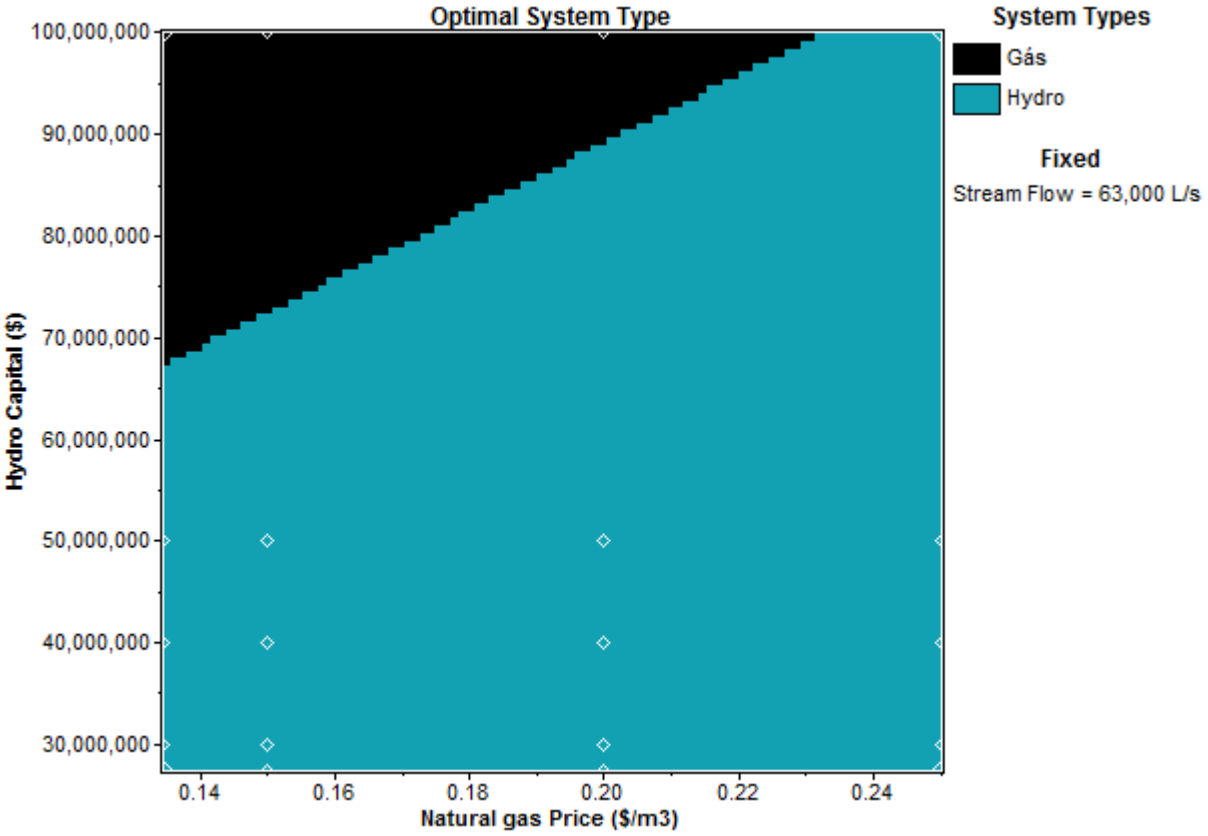


Figura 51: Tipo de sistema ótimo

Para avaliar os efeitos do custo da energia hidrelétrica no sistema, a fonte hidráulica foi remodelada para suprir de 0% a 100% da energia de pico requerida pela carga, sendo esta ligada ao custo de capital da unidade geradora para manter a proporcionalidade, ou seja, para 10% da vazão, o custo também será um décimo. A análise foi feita para o valor estimado (1300U$/kW) de instalação e para um custo de instalação de 2000 U$ o kW, o maior custo presente no trabalho de dissertação (FARIA, 2011, p.150) sobre pequenas centrais hidrelétricas de Faria. A tabela 10 mostra os dados referentes ao sistema nominal

O crescimento do custo a partir da instalação de 14700 kW é devido ao superdimensionamento do potencial hidrelétrico. Se paga o valor total para adição de potência instalada, mas esta potência raramente gera energia (possui fator de carga muito baixo), tendo, portanto, um custo maior. Vale ressaltar que o custo da geração puramente hidrelétrica, mesmo com um fator de carga baixo, com o maior custo estimado ainda é mais de 40% mais barata do que a alternativa térmica.

Potencial hidrelétrico	Potência instalada a gás natural	1300 U$/kW. Custo energia por kWh	2000 U$/kW. Custo energia por kWh	Porcentagem de energia renovável (%)
0	17000	0,058	0,058	0
2100	15000	0,052	0,053	21
4200	13000	0,046	0,048	41
6300	11000	0,039	0,043	59
8400	9000	0,032	0,037	75
10500	7000	0,025	0,031	87
12600	6000	0,022	0,029	94
14700	4000	0,020	0,029	98
16800	2000	0,020	0,031	99,6
18900	1000	0,022	0,030	99,9
21000	0	0,024	0,033	100

Tabela 10. Características do custo total em função da disponibilidade hidroelétrica.

As informações presentes nesta tabela foram transformadas na figuras 52.

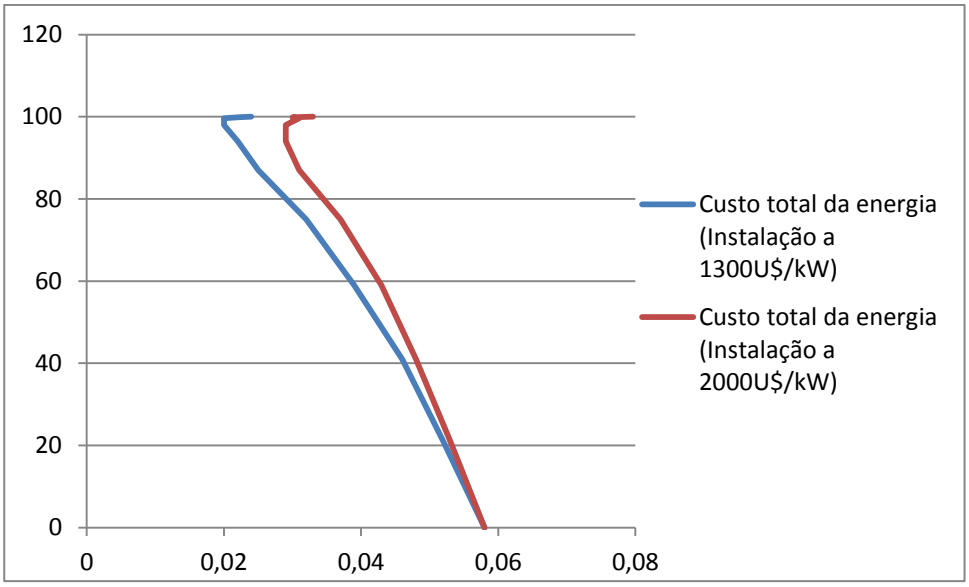


Figura 52: Custo total de energia relativo à disponibilidade para os dois preços de instalação hidrelétrica.

É interessante perceber (na *figura 52*) a diferença do ponto de ótimo do sistema, sendo que com o maior capital o efeito é mais significativo.

Viabilidade atual

Os custos presentes e as características de resposta à flutuação a tornam atualmente a melhor e mais barata alternativa de geração de energia elétrica, desde que haja recurso natural disponível. Mesmo com um custo no limite superior, está geração ainda é mais viável do que as outras formas analisadas. O resultado dá suporte à afirmação que, caso seja ambientalmente e socialmente viável, esta forma de energia deve ser a primeira a ser explorada.

6. Conclusão

A partir dos dados obtidos pelas simulações é possível concluir que a energia eólica chegou a um patamar de competitividade em relação a suas concorrentes na expansão da matriz energética. A geração de energia a partir de combustíveis fósseis está cada vez mais pressionada devido à emissão de gases poluentes responsáveis pelo efeito estufa, a hidrelétrica está limitada pelos seus impactos ambientais de instalação e localidades de disponibilidade e a energia nuclear estancada por questões de segurança e a questão do lixo radiativo.

A manutenção da taxa de crescimento econômico de uma nação está intrinsecamente ligada à disponibilidade e ao custo da energia elétrica, uma energia mais cara eleva os custos de produção de bens de consumo, aumentando consequentemente seus preços e diminuindo sua competividade contra produtos importados.

Quanto ao funcionamento do software, esse se mostrou confiável ao analisar cada simulação, como as otimizações e sensibilidades são apenas repetições dessas simulações, as análises se tornam fiáveis. Os resultados foram comparados com os obtidos no documento *"Renewables 2011- global status report"* (REN21, 2011, p.33) reafirmando a validade dos cálculos. O software, porém, possui gráficos de saída de difícil leitura e não é capaz de realizar gráficos tridimensionais. Outro problema é não haver múltiplas entradas de fontes de energia, por não ser possível utilizar dois perfis de ventos distintos, por exemplo, torna sua utilização mais limitada.

Dos resultados das simulações é visível que na falta de potencial hidroelétrico, a fonte de energia renovável a se recorrer deve ser a eólica. Essa fonte de energia tem um custo bastante próximo ao da energia mais utilizada para a expansão da matriz energética, contando ainda com as vantagens de não emitir gases nocivos ao ambiente e ser invariante, depois de instalada, à variações de preços de insumos.

Os custos são praticamente idênticos, sendo que pequenas flutuações de custo e de regime de ventos são responsáveis pelo desempate entre estas fontes. Com a massificação da tecnologia de produção e aumento no número de empresas fornecedoras é esperada a diminuição do custo da energia eólica nos próximos anos.

As mesmas expectativas não se aplicam à energia fotovoltaica, uma vez que o custo estimado dessa é mais de cinco vezes maior que o valor obtido para a energia térmica a gás. Pelos resultados, é esperado que esta geração continue restrita a localidades isoladas ou aplicações onde o custo não é o fator limitante, como em aplicações espaciais.

Para os próximos anos é clara a tendência de reformulação da matriz energética. Deve-se esperar uma participação cada vez maior da energia eólica na matriz nacional, ocupando um espaço que vem sendo gerado pelo acelerado crescimento econômico. Embora o número de instalações

fotovoltaicas deva crescer nos próximos anos, essa geração ainda é impraticável em larga escala e, portanto, não deve assumir um papel de destaque no cenário mundial. Os recursos hidrelétricos devem ser explorados até o esgotamento das instalações plausíveis.

Existe a necessidade, para a continuidade do crescimento nacional e respeito aos acordos ambientais, de aumento da produção energética de fontes renováveis e a energia eólica se presta a isso com um custo competitivo.

Os estudos realizados neste trabalho poderiam ser continuados com análises mais profundas da principal energia alternativa atual, a eólica. Esses estudos poderiam adicionar variáveis de sensibilidade como a influência das velocidades do vento e diferentes custos de ligação ao sistema. Além disso, poder-se-ia verificar a implementação exclusivamente no caso brasileiro, considerando despachos energéticos e implementações em localidades reais, incluindo tanto a integração destas formas de energia na matriz nacional quanto os seus custos de integração ao sistema interligado. Um estudo mais aprofundado poderia incluir também a operação em conjunto com energia hidrelétrica, procurando os melhores despachos energéticos possíveis em termos de custo, de produção renovável e de produção eólica, verificando os custos em cada iteração.

7. Referências Bibliográficas

FARRET F. A; SIMÕES M. A. “Integration of Alternative sources of energy”. New Jersey: WILEY-INTERSCIENCE, 2006.

SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H.J. *"Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells"* . Journal of Applied Physics. California. Março 1961. Vol.32 - pp. 510-519; DOI:10.1063/1.1736034

LOSTER, M. Imagem concedida pela licença GNU. 2008. Disponível em:
<http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/ >
Acesso em: 04/10/2011

WIKIPEDIA. Betz Law. 2011. Disponível em:
< http://en.wikipedia.org/wiki/Betz'_law>
Acesso em: 12/10/2011

FOREXPRO. Dados Históricos de Futuros de Gás Natural. 2011. Disponível em:
<http://www.forexpros.com.pt/commodities/natural-gas-historical-data>
Acesso em: 20/10/2011

CONGENRIO. Notícia 3 . 2010. Disponível em:
<http://www.cogenrio.com.br/Prod/Casos.aspx?Noticia=3 >
Acesso em: 18/10/2011

EBAH. Estudos de viabilidade econômica de usinas termoelétricas. 2011. Disponível em:
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAfAkAH/estudos-viabilidade-economica-usinas-termoeletricas>
Acesso em: 25/10/2011

FARIA F. A. M. “Metodologia de prospecção de pequenas centrais hidrelétricas”. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. p. 150.

BERMANN, C. Valor adotado para instalação de energia hidrelétrica. 2010. Disponível em:
<http://www.socioambiental.org/esp/bm/inv.asp>
Acesso em:08/10/2011

TIBA C. “Atlas solarimétrico do Brasil”. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. p 59.

SUNTECH POWER. Utility Scale.2011. Disponível em:
<http://ap.suntech-power.com/en/products/utility-scale.html>
Acesso em: 12/ 10/ 2011

AFFORDABLE SOLAR. Solar panels by the pallet. 2011. Disponível em:
<http://www.affordable-solar.com/store/solar-panels-by-the-pallet/Suntech-STP280-24-Vd-280W-Solar-Panel_3-pallet-21>
Acesso em: 25/ 10/ 2011

SUTULA A. R. “Solar Energy Technologies Program”. Estados Unidos: U.S. Department of Energy, 2007. p. 43.

AMARANTE O. A. C; BROWER M.; ZACK J.; SÁ A. L. “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”. Brasília: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2001. p.31-43.

VESTAS. “Product brochure V82-1650kW”. Dinamarca: Vestas, Ano não disponível.

BLOOMBERG. Wind turbine prices. 2011. Disponível em:
<http://www.bloomberg.com/news/2011-02-07/wind-turbine-prices-fall-below-1-million-euros-per-megawatt-bnef-says.html>
Acesso em: 14/ 10/ 2011

O GLOBO. Rio ganhará primeiro parque eólico com investimento de 600 milhões. 2011. Disponível em:
<http://oglobo.globo.com/economia/mat/2011/06/10/rio-ganhara-primeiro-parque-eolico-com-investimento-de-600-milhoes-924664488.asp>
Acesso em: 14/ 10/ 2011

WIND ENERGY. Economics of Wind Power – Chapter 1. 2011. Disponível em:
<http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-3-economics-of-wind-power/chapter-1-cost-of-on-land-wind-power/operation-and-maintenance-costs-of-wind-generated-power.html>
Acesso em: 25/10/2011

WIND POWER MONTHLY. Breaking Down Cost Wind Turbine Maintenance.2011. Disponível em:

<http://www.windpowermonthly.com/news/1010136/Breaking-down-cost-wind-turbine-maintenance/>
Acesso em: 25/10/2011

Nossa Caixa Desenvolvimento. Linhas de financiamento. 2011. Disponível em: <http://www.nossacaixadesenvolvimento.com.br/portal.php/linhas-financiamento#projetos-de-investimento>
Acesso em: 25/ 10/ 2011

O GLOBO. Banco Central explica redução da taxa básica de juros para 11,5% ao ano. 2011. Disponível em: <http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2011/10/banco-central-explica-reducao-da-taxa-basica-de-juros-para-115-ao-ano.html>
Acesso em: 28/10/2011

ONS. “Comportamento da carga no subsistema sudeste/centro oeste decorrente das variações de temperatura”. 2002.

TODO ELETRÔNICA. Preços de Inversores. 2011. Disponível em: <http://todoelectronica.com/JH.pdf preços de inversores>
Acesso em: 25/10/211

SOLAR QQQ.Podruct information – Hoppecke OPzS. 2011. Disponível em: <http://www.solar-qqq.de/product_info.php?info=p185_Hoppecke-OPzS.html>
Acesso em: 25/10/2011

WINDANDSUN. Batteries price list. 2011. Disponível em: <http://www.windandsun.co.uk/Prices/prices_batteries.htm>
Acesso em: 25/ 10/ 2011

MME GOV. Leilões de energia. 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/leiloes_de_energia/leilao_de_eolica.html>
Acesso em: 28/ 10/ 2011

REN21. Renewables 2011 – Global Status Report. Relatório Anual. Paris:REN21 Press,2011.