

## 4 Desenvolvimento do Modelo

No intuito de encontrar o perfil de sazonalização ideal para maximizar os ganhos da carteira de contratos foi desenvolvido um modelo de cálculo do lucro anual, o qual foi aplicado para séries de velocidades de vento e de valores de PLD simulados. Os resultados da carteira, por sua vez, foram maximizados considerando a sazonalização ótima do contrato de compra de energia da PCH e utilizando como métrica a maximização da medida  $\hat{\Omega}$ .

### 4.1. Carteira de Contratos

Empresas comercializadoras de energia elétrica realizam operações descasadas com o objetivo de alcançar lucros acima das margens normais das operações casadas, considerando parâmetros de controle de risco. Se a empresa comercializadora possuir uma carteira que abrigue contratos de compra de energia elétrica de uma usina hidrelétrica e de uma usina eólica, a flexibilidade da sazonalização de contratos pode exercer importante influência sobre os resultados. Isto se deve ao fato de existir complementaridade entre o regime natural eólico e o hidrológico em importantes regiões no Brasil.

Desta forma, para encontrar a decisão de sazonalização mais adequada para maximizar os lucros de uma carteira, foi considerada uma comercializadora com os seguintes contratos firmados:

- Um contrato de fornecimento de 30MWmed mensais durante o ano de 2012 com preço de venda de 90R\$/MWh;
- Um contrato de compra de toda energia elétrica produzida por usina eólica com capacidade instalada de 30MWmed e fator de capacidade 45%. O preço fixado para a compra da energia de fonte eólica foi 100R\$/MWh;
- Um contrato de compra de 15MWmed mensais de umaPCHcom capacidade instalada de 30MWmed durante o ano de 2012, podendo o fornecimento mensal de energia ser sazonalizado entre 0 e 30MWmed. O preço fixado para a compra de energia da PCH foi 80R\$/MWh.

Portanto, considerando a carteira de contratos descrita, verifica-se que a quantidade de energia vendida mensalmente é fixa em 30MWmed, mas os montantes de energia comprados mensalmente da usina eólica e da PCH são variáveis. Devido à imprevisibilidade dos ventos o montante de energia produzido pela usina eólica varia durante os meses do ano, e com a sazonalização a quantidade de energia mensal entregue pela PCH também poderá variar. Assim, nos meses em que o montante de energia elétrica comprado for superior a 30MW o excedente será vendido no mercado de curto prazo ao valor do PLD mais o ágio, enquanto que nos meses em que houver déficit a diferença será adquirida a PLD mais ágio.

O lucro líquido mensal da empresa comercializadora será calculado através da equação (3):

$$\Pi_{m,i} = [(E_v \times P_v - E_{eol} \times P_{eol} - E_h \times P_h) \times h_m + (E_{eol} + E_h - E_v) \times h_m \times (PLD + \text{ágio})] \times (1 - IR) \quad (3)$$

Onde:

$\Pi_{m,i}$  : lucro líquido obtido no mês  $m$  na série  $i$ ;

$E_v$  : montante de energia elétrica vendida no mês  $m$  na série  $i$  em MWmed;

$E_{eol}$  : montante de energia elétrica comprada da usina eólica no mês  $m$  na série  $i$  em MWmed;

$E_h$  : montante de energia elétrica comprada da PCH no mês  $m$  na série  $i$  em MWmed;

$P_v$  : preço de venda da energia elétrica em R\$/MWmed;

$P_{eol}$  : preço de compra da energia elétrica da usina eólica em R\$/MWmed;

$P_h$  : preço de compra da energia elétrica da usina hidrelétrica em R\$/MWmed;

$h_m$  : quantidade de horas do mês  $m$ ;

$IR$  : total de impostos e taxas.

O lucro líquido anual ( $\Pi_a$ ) será dado pelo somatório dos lucros mensais, que variam devido às duas incertezas existentes: valor do PLD e montante de energia eólica comprada ( $E_{eol}$ ) no mês considerado. A análise proposta nesta dissertação consiste em encontrar a forma mais adequada de sazonalização de  $E_h$  para maximizar a medida Ômega da distribuição dos resultados anuais, conforme expressão (4).

$$\max_{E_h} \Omega(L, \Pi_a) \quad (4)$$

Onde:

$\Pi_a$  : lucro líquido anual;

$L$  : meta definida exogenamente.

O preço de venda ( $P_v$ ) da energia elétrica considerado foi 90R\$/MWh e a quantidade de energia vendida mensalmente ( $E_v$ ) foi fixada em 30MWmed, conforme mencionado anteriormente. Os preços de compra de energia elétrica contratados com a usina eólica ( $E_{eol}$ ) e com a PCH ( $E_h$ ) utilizados foram 100R\$/MWh e 80R\$/MWh, respectivamente. Os preços assumidos para a energia elétrica nos contratos que compõem a carteira correspondem a valores de mercado obtidos através de informações transmitidas por profissional do setor de comercialização.

A parcela referente aos impostos ( $IR$ ) foi calculada considerando-se  $IRPJ+CSSL$  igual a 34% do lucro real e  $PIS+COFINS$  igual a 9,25% pelo sistema não cumulativo.

A Tabela 3 traz o resumo das informações dos contratos que compõem a carteira em questão.

**Tabela 3 - Resumo de informações contratuais.**

|                   | Valor      | Característica |
|-------------------|------------|----------------|
| $E_v$             | 30MWmed    | fixo           |
| $P_v$             | 90R\$/MWh  | fixo           |
| $E_h$             | 15MWmed    | sazonalizável  |
| $P_h$             | 80R\$/MWh  | fixo           |
| $E_{eol}$         | -          | variável       |
| $P_{eol}$         | 100R\$/MWh | fixo           |
| <b>IRPJ+CSSL</b>  | 34%        | fixo           |
| <b>PIS+COFINS</b> | 9,25%      | fixo           |

Fonte: elaboração própria.

#### 4.2. Simulação dos Ventos

O montante de energia elétrica a ser produzido mensalmente pela usina eólica considerada neste trabalho pode ser estimado através da simulação da velocidade dos ventos na região de sua localização. Segundo Silva (1999), as distribuições de Rayleigh e Weibull são as mais utilizadas para modelar as curvas de frequência de velocidade dos ventos. A experiência mostra que para determinadas localidades em certos períodos do ano a distribuição de Weibull ajusta-se razoavelmente bem ao histograma de velocidades, apresentando melhores resultados do que aqueles fornecidos pela Rayleigh.

Dalbem (2010) explica que a função densidade de probabilidade da distribuição Weibull depende do parâmetro de escala A (em m/s) e do parâmetro de forma k (adimensional):

$$fdp_{Weibull}(v) = \frac{k}{A} \left( \frac{v}{A} \right)^{(k-1)} \cdot e \left( - \frac{v}{A} \right)^k \quad (5)$$

Onde:

$$A = \frac{\bar{v}}{\Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (6)$$

, sendo  $\Gamma$  a função Gama e  $\bar{v}$  a velocidade média do vento e

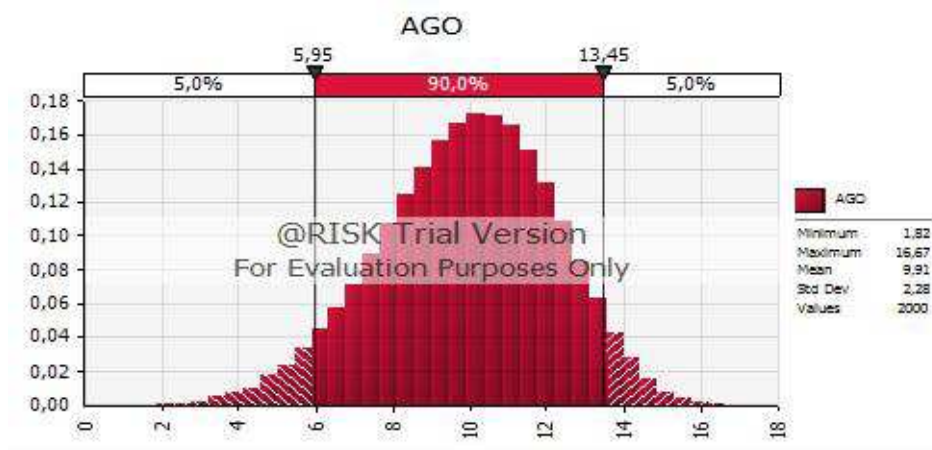
$$k = \left( \frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1,086} \quad (7)$$

, sendo  $\sigma$  a volatilidade da velocidade do vento.

A metodologia utilizada para gerar as séries sintéticas de velocidades dos ventos foi semelhante à demonstrada em Salles (2004) e Dalbem (2010). A partir de curvas Weibull mensais relativas a um *site* no Nordeste do Brasil e disponibilizadas por investidores de um projeto inscrito nos leilões de 2008 foi utilizada a Simulação de Monte Carlo (SMC) para sortear as velocidades do vento. As 12 distribuições Weibull utilizadas, relativas a cada mês do ano, foram obtidas a partir de séries históricas de velocidade do vento tomadas no referido *site* a cada 10 minutos durante um ano e já ajustadas para a altura do eixo do rotor.

É importante observar que, segundo Gerdes e Strack (1999), a situação ideal é ter disponíveis séries históricas de velocidades dos ventos medidas de forma precisa durante um período de cinco a dez anos. Desta forma é possível identificar variações entre as médias anuais de velocidade e evitar previsões superestimadas ou subestimadas. Entretanto, no Brasil as séries históricas ainda são escassas e geralmente abrangem períodos curtos de tempo.

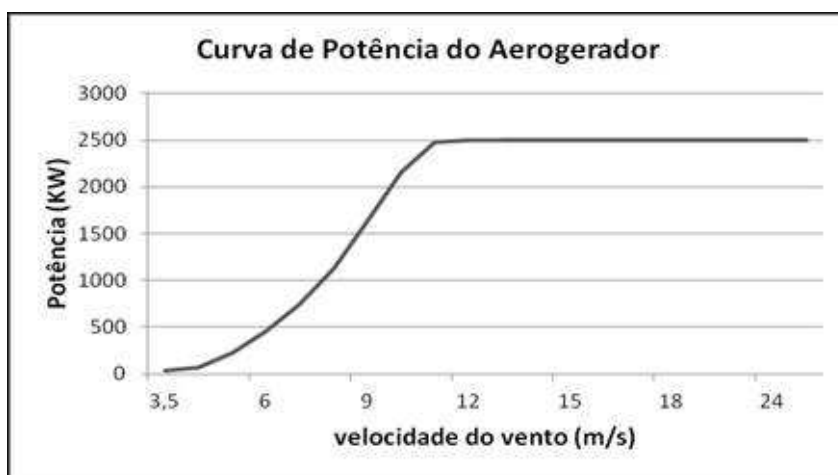
As simulações que resultaram em 2000 séries mensais de velocidades foram realizadas utilizando o software @Risk desenvolvido pela empresa Palisade Corporation. A Figura 2 mostra a função densidade de probabilidade Weibull para o mês de agosto no *site* utilizado para a análise realizada.



**Figura 3 – FDP Weibull para o mês de agosto.**

Fonte: elaboração própria.

Os valores encontrados para as séries sintéticas de velocidades do vento foram transformados em potências mensais através da curva de potência do aerogerador de modelo FL 2500/100 do fabricante Fuhrlander mostrada na Figura 4.

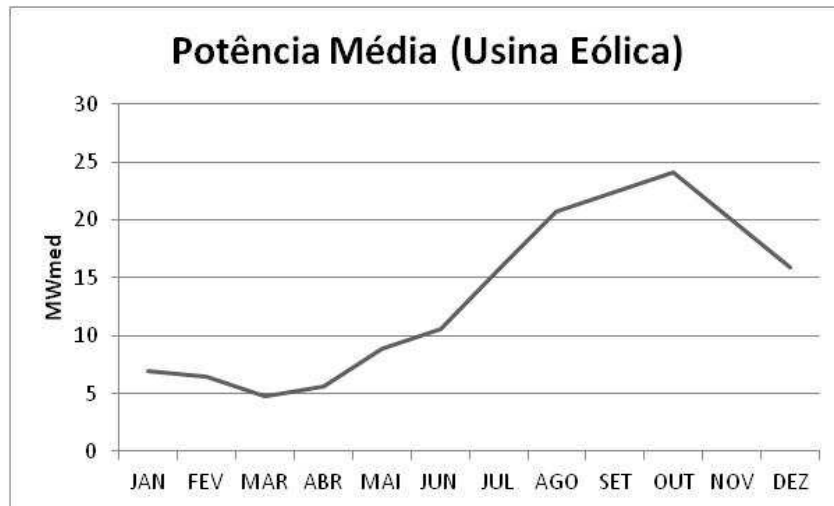


**Figura 4 – Curva de Potência do Aerogerador.**

Fonte: elaboração própria.

Como resultado foram obtidas 2000 séries de potências mensais em KWmed que correspondem ao montante produzido por um aerogerador. Entretanto, a capacidade instalada da usina eólica considerada é de 30 MWmed com 12 aerogeradores em operação e por isso os resultados encontrados foram

multiplicados por 12 para determinar a produção total. A estimativa dos montantes médios de energia a serem produzidos mensalmente pela usina eólica pode ser observada na Figura 5.



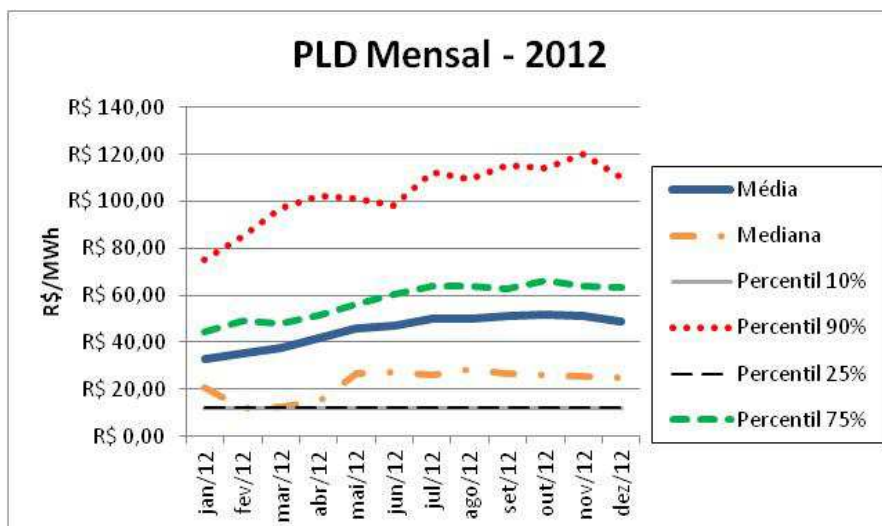
**Figura 5 – Potências médias mensais estimadas.**

Fonte: elaboração própria.

#### **4.3. Simulação dos PLDs**

A simulação dos preços dos PLDs foi realizada através do programa Newave que foi executado utilizando os dados de entrada disponibilizados pela CCEE em 2010. O Newave é o modelo utilizado na formação dos preços praticados no mercado de curto prazo publicados pela CCEE.

Foram obtidas 2000 séries de valores de PLD para cada um dos meses de 2012 no submercado do Nordeste, onde a empresa comercializadora considerada neste trabalho realiza operações. Na Figura 6 e na Tabela 4 podem ser observados os dados estatísticos das séries simuladas.



**Figura 6 – PLD mensal para 2012.**

Fonte: elaboração própria.

**Tabela 4 - Estatística Descritiva PLD 2012.**

|               |        |
|---------------|--------|
| Máximo        | 689,18 |
| Mínimo        | 12,08  |
| Média         | 45,36  |
| Mediana       | 22,71  |
| Amplitude     | 677,10 |
| Desvio Padrão | 59,02  |

Fonte: elaboração própria.

#### 4.4. Otimização

O valor do lucro líquido anual da empresa comercializadora é obtido através da soma dos lucros líquidos mensais, que variam de acordo com a quantidade de energia comprada da PCH e da usina eólica e com o valor do PLD estimado para o respectivo mês. A equação (3) descrita no item 4.1 demonstra o cálculo do lucro líquido mensal.

O valor do PLD e a velocidade dos ventos, que foram estimados através das metodologias descritas neste capítulo, são variáveis independentes. Devido ao fato do parque de geração de energia elétrica brasileiro ser predominantemente formado por hidrelétricas para o cálculo do PLD são utilizados modelos



matemáticos que buscam encontrar a solução ótima de equilíbrio entre o benefício presente do uso da água e o benefício futuro de seu armazenamento. A velocidade dos ventos, por sua vez, é estimada através de dados históricos do regime de ventos na região onde a usina eólica está localizada.

Uma planilha MS Excel contendo 2000 valores para o lucro líquido anual da empresa comercializadora foi construída a partir dos dados estimados: 2000 séries de PLDs mensais estimados e 2000 séries de potências mensais a serem geradas pela usina eólica. O lucro anual foi obtido através da soma dos lucros líquidos mensais que foram distribuídos em 12 colunas da planilha e que dependiam do perfil de sazonalização da energia elétrica comprada da PCH. Devido à flexibilidade contratual da sazonalização a quantidade de energia comprada mensalmente da PCH poderia variar entre 0MWmed e 30MWmed, mas o montante anual deveria ser 180MWmed. O perfil de sazonalização, portanto, determinaria o lucro líquido anual e a maximização da medida  $\hat{\Omega}$  calculada utilizando a metodologia apresentada no item 2.2 permitiu encontrar a distribuição adequada para aumentar os ganhos.

O programa *add-in* Solver integrado à planilha MS Excel foi utilizado para determinar as distribuições dos montantes mensais do contrato de compra de energia elétrica da PCH necessárias para maximizar a medida  $\hat{\Omega}$  e encontrar os resultados apresentados no Capítulo 5.

Simões e Gomes (2011) utilizam metodologia semelhante para determinar a melhor forma de sazonalizar a Energia Assegurada de uma hidrelétrica de modo a maximizar seu resultado. Entretanto, o presente estudo inova ao abordar uma comercializadora que possui contratos de compra de energia de uma usina eólica e de uma pequena central hidrelétrica.