

PLANO ENERGÉTICO RENOVÁVEL **CABO VERDE**



**Especificação conceptual do
modelo SIMRES®**



Copyright © 2011, Gesto Energia S.A.

Av. Cáceres Monteiro nº 10, 1º Sul

1495-131 Algés

Portugal



O presente documento foi elaborado pela GESTO ENERGIA S.A. (Gesto), empresa do grupo Martifer especialista em consultoria energética e estudos de avaliação de Potencial de energias renováveis, para a Direcção Geral de Energia de Cabo Verde.

A publicação, reprodução ou distribuição (total ou parcial) da informação contida neste documento carece de prévia autorização, por escrito, da Gesto.

O conteúdo publicado neste documento baseia-se na avaliação de um conjunto de informações e dados recolhidos e analisados até à data. Com a recolha de novos dados, a Gesto reserva-se o direito de ajustar ou alterar a respectiva análise. Acresce que este documento contém informação recolhida através de diversas fontes, devidamente identificadas, que deverá ser interpretada no contexto das mesmas, não podendo ser imputada qualquer responsabilidade à Gesto pelo conteúdo dessa informação.

A Gesto não poderá ser responsabilizada pela utilização, por parte da Direcção Geral de Energia de Cabo Verde ou por terceiros, da informação contida neste documento.

(Miguel Barreto)



LISTA DE ABREVIATURAS

ELECTRA – Empresa de Electricidade e Águas de Cabo Verde

FER – Fontes de Energias Renováveis

Hz - Hertz

INESC – Instituto Nacional de Engenharia de Sistemas e Computadores

kW – Quilowatt

kW/h – Quilowatt hora

LCOE – Levelized Cost of Energy

min - Minuto

NEP - Número de horas equivalente à potência nominal

PSS/E - Power System Simulator for Engineering

PV – Fotovoltaico

RES – Fonte de Energia Renovável

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

s - segundo

SPV – Sistemas Fotovoltaico

SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

UCTE – Union for the Co-ordination of Electricity Transmission



ÍNDICE DE TEXTO

1	INTRODUÇÃO	1
2	ESTUDOS DE ESTABILIDADE DAS REDES	3
3	LIMITAÇÕES TÉCNICAS	5
3.1	Reserva Girante E CONTROLO DE FREQUÊNCIA	5
3.2	Reserva térmica	6
3.3	LIMITES DE INTEGRAÇÃO	7
4	MODELO SIMRES® - Análise e Optimização da penetração de renováveis	9
4.1	MODELAÇÃO DE DADOS DE ENTRADA	9
4.1.1	DIAGRAMA DE CARGA	9
4.1.2	DIAGRAMA DE PRODUÇÃO SOLAR	11
4.1.3	DIAGRAMA DE PRODUÇÃO EÓLICA	12
4.1.4	DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS A SIMULAR	18
4.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	20
4.2.1	Exemplo de Funcionamento	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura G3.1 - Arquitectura de sistema de regulação de frequência (UCTE)	5
Figura G3.2- Alocação da potência de um grupo gerador no controlo de frequência	6
Figura G4.1 – Interpolação linear da carga	10
Figura G4.2 - Método para construção do diagrama de carga semanal	10
Figura G4.3 - Método para construção do diagrama de carga anual	11
Figura G4.4 – Exemplo de <i>output</i> do <i>software</i> do <i>PVSystem</i>	11
Figura G4.5 – Variação sazonal da velocidade do vento baseado nos dados medidos (Novembro 2001 – Outubro 2002)	13
Figura G4.6 - Curva de potência - <i>Vestas V52 - 850 kW</i>	16
Figura G4.7- Diagrama de funcionamento <i>SIMRES®</i>	21
Figura G4.8 - Resultados <i>SIMRES®</i> - Santiago 2020 – Cenário Integração 50% Renovável	25

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro G3.1 - Limites de integração de renováveis em 2015	7
Quadro G3.2 - Limites de integração de renováveis em 2020	7
Quadro G4.1- Medições de vento	12
Quadro G4.2 - – Períodos tempo relativos aos dados de vento extrapolados.....	13



Quadro G4.3 – Velocidade média do vento para cálculo do expoente de camada limite	15
Quadro G4.4 – Expoente de camada limite teórico	15
Quadro G4.5 - NEP's e Rácio NEP's para cálculo de curva de produção de referência	17
Quadro G4.6 - Consumo Anual e Factor de Adaptação.....	20
Quadro G4.7 - Limitações do Sistema	22
Quadro G4.8 – Parâmetros da Unidades de Produção	23



1 INTRODUÇÃO

O presente documento foi elaborado no âmbito do Plano Energético Renovável de Cabo Verde, desenvolvido pela GESTO ENERGIA S.A. para a Direcção Geral de Energia de Cabo Verde, entre Janeiro de 2010 e Janeiro de 2011, dele fazendo parte integrante.

De forma a analisar e otimizar a penetração de energias renováveis, foi desenvolvida uma ferramenta que permite a modelação de dados de forma automática: *SIMRES*[®].

O *SIMRES*[®] pode ser definido como um instrumento de calendarização da operação das unidades de produção ao longo de determinado período de tempo, *i.e.* possibilita, não só a determinação do despacho, assim como uma resolução simplificada do problema de *unit commitment*.

Os resultados originados na modelação permitem avaliar o potencial impacto da integração dos projectos de energias renováveis identificados no sistema através da análise do número de horas marginais, integração real global e de cada tecnologia utilizada, desperdício e número de desastros.



2 ESTUDOS DE ESTABILIDADE DAS REDES

Em parceria com a Unidade de Sistemas de Energia do INESC foram desenvolvidos estudos de avaliação do impacto da integração de fontes de energia renovável nas redes eléctricas das diferentes ilhas que integram o âmbito do projecto. Estes estudos foram realizados com recurso a modelos matemáticos disponíveis na plataforma de simulação PSS/E (*Power System Simulator for Engineering*¹)

Com base nos diagramas de carga típicos, características do parque electroprodutor e arquitectura da rede eléctrica das diferentes ilhas, foram realizadas análises em regime permanente associadas a trânsitos de potência para cada um dos cenários estabelecidos, nomeadamente:

- Níveis de congestionamento;
- Perdas;
- Variações de perfis de tensão;
- Análise de contingências em regime N-1.

Nestes estudos foi tida em conta a variabilidade e incerteza associadas à disponibilidade dos recursos renováveis estudados, tendo sido avaliados os impactos que alterações climáticas bruscas poderão ter na produção de energia de origem fotovoltaica e eólica, tendo sido elaborada uma especificação técnica conceptual para um sistema de previsão de produção eólica e solar².

Perante variações acentuadas e simultâneas dos principais recursos renováveis, foram analisados em regime dinâmico³, os comportamentos de algumas grandezas no domínio do tempo, nomeadamente:

- Frequência da rede;
- Tensões em nós da rede;
- Variáveis eléctricas dos diferentes geradores.

Todos os estudos técnicos desenvolvidos tiveram em consideração os seguintes elementos:

- Os limites de operação dos grupos térmicos instalados nas diversas ilhas;
- Os benefícios da instalação de projectos de bombagem pura para armazenamento de energia (nas ilhas em que tal recurso existe);
- Os critérios de mérito e reserva discutidos e validados pela Direcção de Planeamento da ELECTRA;
- A definição das contingências a simular (caso mais gravoso do ponto de vista da rede).

Dos estudos técnicos desenvolvidos resultaram limitações que foram tidas em consideração na especificação dos cenários considerados no Plano Energético Renovável de Cabo Verde.

¹ <http://www.energy.siemens.com/us/en/services/power-transmission-distribution/power-technologies-international/software-solutions/pss-e.htm>

² ESTUDO DO SECTOR ELÉCTRICO E PLANO DE INVESTIMENTOS EM INFRA-ESTRUTURAS

³ Nos estudos de comportamento dinâmico foi adoptada a filosofia de nó único



Tendo em vista a gestão dos sistemas em cenários de elevada penetração de energias renováveis, foram desenvolvidas especificações técnicas para sistemas de despacho locais, a instalar em cada uma das ilhas no âmbito do projecto, sistemas que permitirão realizar uma gestão segura e otimizada de cada uma das redes e que compreendem as seguintes funcionalidades:

- SCADA para despacho local;
- Gestão do sistema produtor;
- Previsão de cargas, agregada por ilha para horizontes temporais entre 4 e 24 horas atendendo às características dos equipamentos de produção térmica convencional;
- Integração com o sistema de previsão de produção renovável (também especificado conceptualmente) intermitente para diferentes horizontes temporais (entre 4 e 24 horas);
- *Unit commitment* com o objectivo de definir a estratégia otimizada de utilização dos meios de produção, nomeadamente os térmicos, incluindo a definição do arranque e paragem das unidades.

3 LIMITAÇÕES TÉCNICAS

3.1 RESERVA GIRANTE E CONTROLO DE FREQUÊNCIA

A reserva girante é a capacidade (potência activa) não utilizada e imediatamente disponível que pode ser solicitada por decisão do operador do sistema, fornecida por unidades sincronizadas com a rede.⁴

A existência desta reserva é imperativa uma vez que dela dependem a estabilidade e segurança da rede, não só pela necessidade de garantia de disponibilidade de potência em caso de aumento brusco do consumo, mas também para a regulação de frequência.

Em conjunto com a Direcção de Planeamento da ELECTRA definiu-se a necessidade de assegurar em permanência uma reserva girante mínima de 60% da energia renovável injectada na rede, sendo que a rede actualmente explorada admite variações de frequência de +/-2Hz, relativamente à frequência nominal, durante um período máximo de 3s.

Na Figura G3.1 apresenta-se, de forma simplificada, a arquitectura típica para regulação da frequência segundo a UCTE⁵

A regulação e frequência envolvem tipicamente três níveis: Primário, Secundário e Terciário:

- **Controlo Primário:** Controlo local automático que entrega potência de reserva em oposição a qualquer variação de frequência;
- **Controlo Secundário:** Controlo centralizado automático que entrega potência de reserva de forma a devolver a frequência ao valor pretendido;
- **Controlo Terciário:** modificação manual no despacho e da *unit commitment* de forma a restaurar a reserva do controlo secundário e, assim, gerir eventuais congestões e devolver a frequência ao valor pretendido, se a reserva estabelecida pelo controlo secundário não foi suficiente.

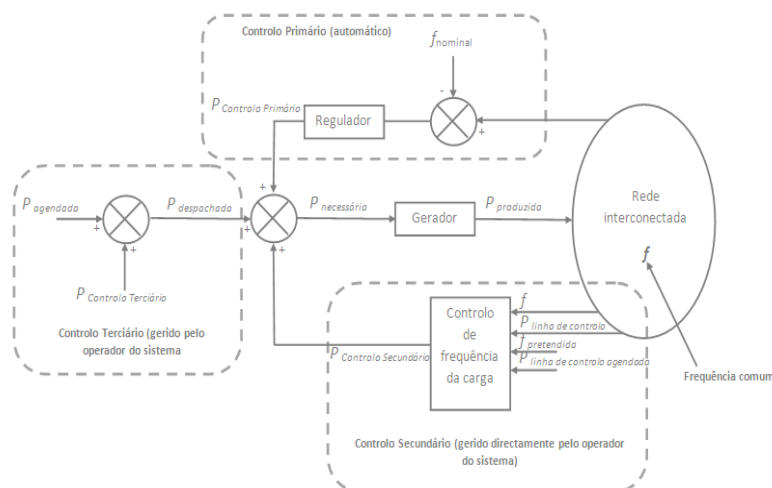


Figura G3.1 - Arquitectura de sistema de regulação de frequência (UCTE)

⁴ Fonte: (Yann REBOURS)

⁵ The "Union for the Co-ordination of Electricity Transmission" (UCTE) is the association of transmission system operators in continental Europe that provides a reliable market base to all market participants: <http://www.ucte.org>



Conforme evidencia o diagrama da figura G3.1, todos os níveis de controlo actuam sobre a velocidade do rotor do gerador, devendo este ter uma capacidade de resposta tão rápida quanto possível quer na manobra de desaceleração quer na manobra de aceleração.

A capacidade de reserva do gerador pode ser assim dividida conforme ilustra a Figura G3.2 em vários escalões.

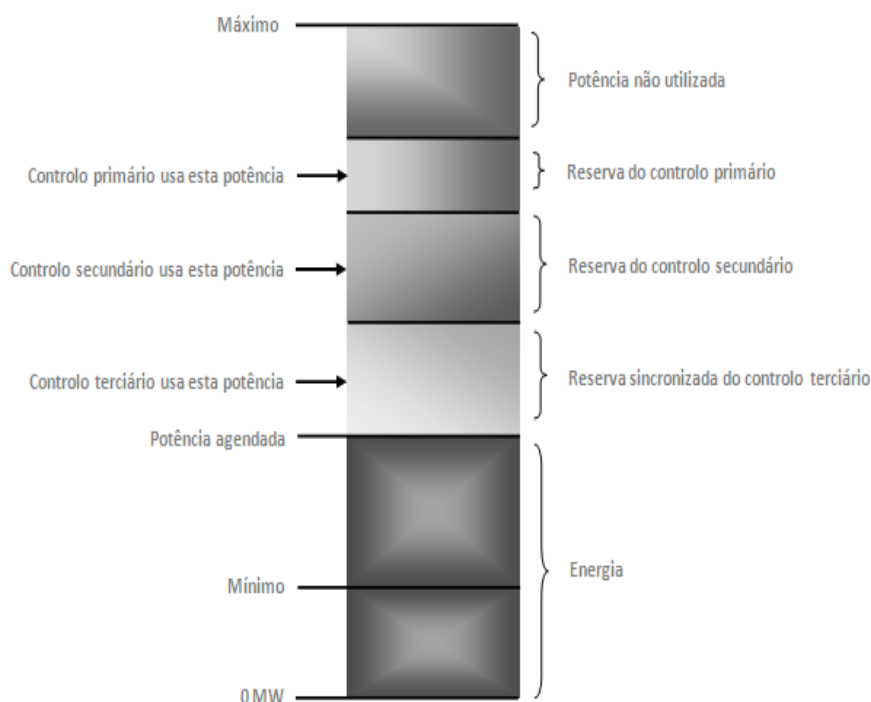


Figura G3.2- Alocação da potência de um grupo gerador no controlo de frequência

3.2 RESERVA TÉRMICA

Além da reserva girante, é considerada também a existência de uma reserva térmica. Esta reserva é a potência adicional que se encontra desconectada do sistema, podendo ser solicitada e colocada em serviço após um determinado período de tempo (*cold start*)

Em sistemas isolados, esta potência corresponde usualmente à potência disponível de geradores de arranque rápido⁶. No entanto, em sistemas interconectados, esta pode incluir a potência disponível noutros sistemas.

Em conjunto com a Direcção de Planeamento da ELECTRA definiu-se a necessidade de constituir uma reserva térmica igual ou superior à ponta do sistema, acautelando a possibilidade de ausência total de produção energética oriunda de aproveitamentos renováveis.

⁶ Fonte: (*Spinning Reserve and Non-Spinning Reserve, January 2006*)

3.3 LIMITES DE INTEGRAÇÃO

Como resultado dos estudos desenvolvidos pela Unidade de Sistemas de Energia do INESC, estabeleceram-se os limites de integração de renováveis para os períodos de cheia/ponta e vazio, apresentados no Quadro G4.11 e Quadro G4.12 em cada uma das ilhas analisadas.

Quadro G3.1 - Limites de integração de renováveis em 2015

	2015					
	Vazio (MW)			Cheia/Ponta (MW)		
	TOTAL	Eólica	Solar	TOTAL	Eólica	Solar
Santiago	14,00	14,00	-	30,00	25,00	5,00
São Vicente	4,57	4,577	-	8,44	6,50	1,94
Sal	3,50	3,50	-	7,00	5,00	2,00
Santo Antão	0,00	0,00	-	2,35	1,85	0,50
Fogo	0,850	0,850	-	2,30	1,80	0,50
Boavista	3.951	3.951	-	5,95	5,95	-
São Nicolau	0,26	0,26	-	0,666	0,33	0,30
Maio	0,383	0,383	-	0,96	0,66	0,30

Quadro G3.2 - Limites de integração de renováveis em 2020

	2020									
	Vazio (MW)					Cheia/Ponta (MW)				
	TOTAL	Eólica	Solar	Flywheel ⁷	Bombagem	TOTAL	Eólica	Solar	Flywheel ⁷	Bombagem
Santiago	32,00	32,00	-	10,00	10,00	37,00	27,00	10,00	10,00	10,00
São Vicente	7,15	7,15	-	3,60	-	14,10	11,60	2,50	3,6 (5,0)	-
Sal	5,20	5,20	-	-	-	10,30	7,30	3,00	-	-
Santo Antão	0,85	0,85	-	-	-	3,35	2,70	0,65	-	-
Fogo	1,10	1,10	-	-	-	3,00	2,00	1,00	-	-
Boavista	6,00	6,00	-	-	-	11,90	11,90	-	-	-
São Nicolau	0,33	0,33	-	-	-	0,73	0,33	0,40	-	-
Maio	0,43	0,43	-	-	-	1,40	0,80	0,60	-	-

⁷ Sistemas de armazenamento de energia – volantes de inércia



4 MODELO SIMRES® - ANÁLISE E OPTIMIZAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE RENOVÁVEIS

4.1 MODELAÇÃO DE DADOS DE ENTRADA

4.1.1 DIAGRAMA DE CARGA

Como foi previamente definido, o modelo SIMRES® calendariza a operação das unidades de produção ao longo de doze meses. Consequentemente, torna-se necessária a caracterização da carga para os 365 dias do ano.

De forma a proceder à referida caracterização anual da carga, foram disponibilizados pela ELECTRA os dados referentes ao ano 2007 (sendo estes que possibilitavam maior coerência na modelação para as ilhas abrangidas pelo projecto).

Estes diagramas apresentam valores de carga horários das várias redes de cada ilha, durante um período de 24 horas. Para cada uma dessas redes, dispõe-se de diagramas de carga diários referentes a um dia útil de semana, um Sábado e um Domingo típico de três meses distintos (Março, Dezembro e Agosto).

Em ilhas onde existem, actualmente, redes separadas, foi considerada a carga total da ilha (soma das cargas das várias redes) considerando-se assim uma rede única.

4.1.1.1 MÉTODO UTILIZADO

Inicialmente, procedeu-se à interpolação linear⁸ dos dados dos referidos diagramas de carga (carga total) de cada ilha (um Sábado, um Domingo e um mesmo dia de semana para cada um dos meses referidos). Este processo permitiu estimar os valores de carga de 10 em 10 minutos entre cada hora (dados fornecidos pela ELECTRA) Equação 4.1.

$$\frac{P - P_0}{x - x_0} = \frac{P_1 - P_0}{x_1 - x_0} \quad (4.1)$$

Resolvendo em função de $P(x)$, sendo esta a potência “instantânea” (considerada durante o intervalo de 10 minutos) para o intervalo (de tempo) x .

$$P = P_0 + (x - x_0) \frac{P_1 - P_0}{x_1 - x_0} = \frac{(x - x_0)P_1 + (x_1 - x)P_0}{x_1 - x_0} \quad (4.2)$$

⁸ Em matemática, denomina-se interpolação linear o método de interpolação que se utiliza de uma função linear $p(x)$ (um polinómio de primeiro grau) para representar, por aproximação, uma suposta função $f(x)$ que originalmente representaria as imagens de um intervalo descontínuo (ou degenerado) contido no domínio de $f(x)$.



Sendo (4.2) a equação utilizada para a interpolação linear do valores de potência ($P(x)$), no intervalo (x_0, x_1) .

A Figura G4.1 apresenta uma amostra exemplificativa da interpolação realizada aos dados de carga horários. Dados os dois pontos inicial e final (vermelho), a linha a preto é interpoladora entre esses pontos, sendo os pontos intermédios, a preto, os valores estimados para os referidos intervalos de 10 minutos.

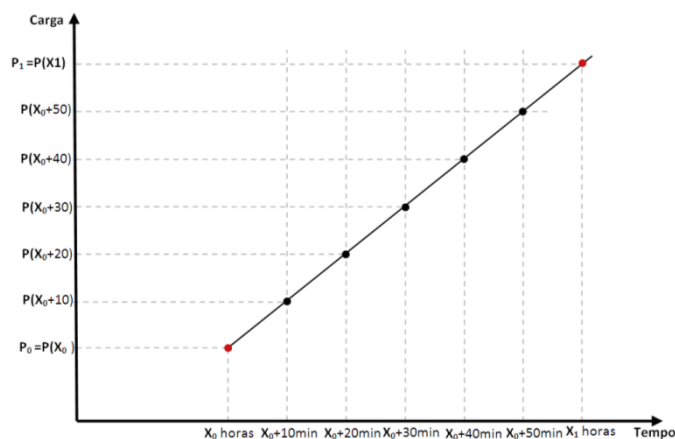


Figura G4.1 – Interpolação linear da carga

Considerando que o diagrama de carga referente ao dia útil de semana é típico e, devido à falta de dados relativos aos restantes dias úteis da semana, considerou-se ser o referido diagrama representativo desses dias.

Desta forma, após a interpolação linear dos diagramas de carga diários, foi possível, seguindo o método apresentado na Figura G4.1, procede-se à construção do diagrama de carga semanal, Figura G4.2, obtendo-se desta forma os valores de carga de 10 em 10 minutos ao longo de toda a semana.

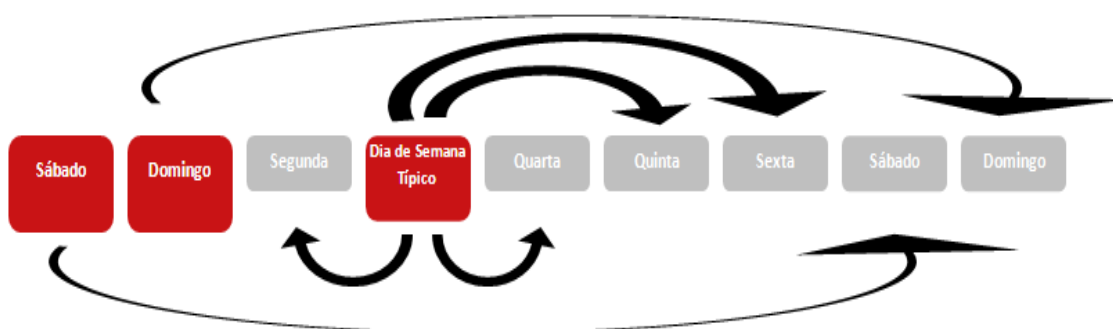


Figura G4.2 - Método para construção do diagrama de carga semanal

Analogamente ao sucedido a nível diário (escassez de dados que permitissem a total caracterização da carga ao longo do ano) o mesmo processo foi seguido a nível mensal. Foi, desta forma, necessário considerar os diagramas existentes de cada mês como representativos dos meses contíguos. Assim, após a construção dos diagramas de carga semanais para as várias ilhas e, tendo em conta a limitação de dados já referida, procedeu-se à construção do diagrama de carga anual seguindo o método ilustrado na Figura G4.3

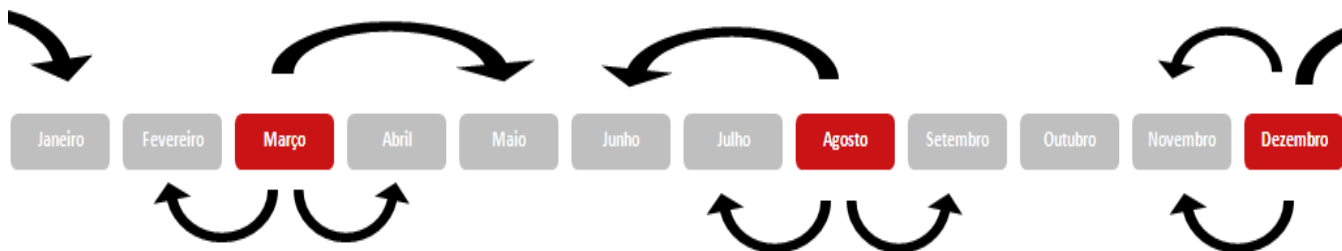


Figura G4.3 - Método para construção do diagrama de carga anual

Foram, desta forma, estimados, os diagramas de carga anuais (52559 intervalos de 10 minutos) para as várias ilhas, partindo de valores reais fornecidos pela ELECTRA.

4.1.2 DIAGRAMA DE PRODUÇÃO SOLAR

O diagrama de produção solar foi resultado da modelação dos dados provenientes de simulações realizadas no *software* para sistemas fotovoltaicos *PVSyst*⁹.

O *PVSyst* permite, dada a localização, potência e tipo de módulos e inversor a instalar, a definição detalhada dos parâmetros que regem o funcionamento da instalação PV. Desta forma, é considerada no resultado final, a análise de efeitos como o comportamento térmico, perdas reais de conversão, perdas relacionadas com o ângulo da radiação, entre outras. Os resultados apresentam o valor horário de produção líquida (à saída do inversor).

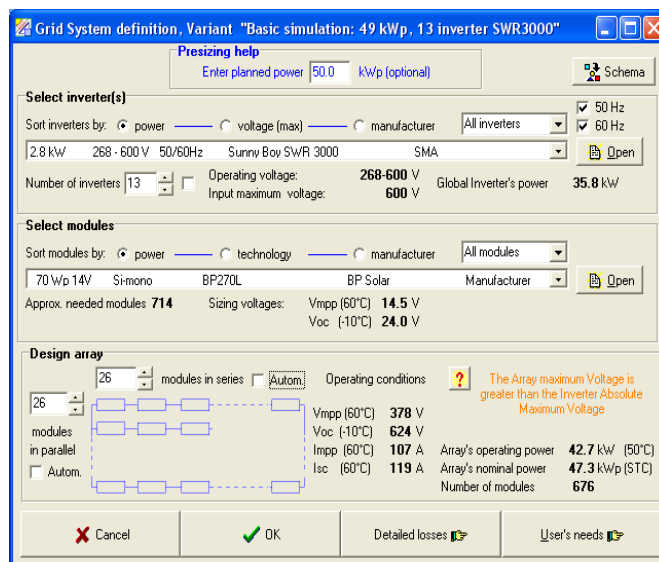


Figura G4.4 – Exemplo de *output* do *software* do *PVSyst*

Analogamente ao procedido para os diagramas de carga, recorreu-se ao método da interpolação linear para estimar os valores de produção em intervalos de 10 minutos, entre os valores horários dados.

⁹ <http://www.pvsyst.com>



De forma a proporcionar a capacidade de integração de projectos solares com distintas potências no modelo *SIMRES*¹⁰, precedeu-se à simulação de determinadas características de referência no *PVSystem*.

Os resultados desta simulação foram alvo da supracitada interpolação linear, permitindo assim estabelecer uma curva referência para diversos projectos (4.3).

$$P_{\text{referência instantânea}}(\%) = \frac{P_{\text{instantânea Projecto base}}}{P_{\text{Nominal Projecto base}}}(\%) \quad (4.3)$$

A curva obtida a partir de (4.3) permite o cálculo da potência instantânea do projecto *i* com potência nominal *i* em (4.4).

$$P_{\text{instantânea Projecto } i} = P_{\text{referência instantânea}}(\%) * P_{\text{Nominal Projecto } i} \quad (4.4)$$

4.1.3 DIAGRAMA DE PRODUÇÃO EÓLICA

O diagrama de produção eólica tem por base a modelação dos dados medidos em três locais distintos no arquipélago de Cabo Verde: na ilha de Santiago - Monte de São Filipe, na ilha de São Vicente - Selada do Flamengo e na ilha do Sal – Palmeira, durante um projecto realizado pela *Risø* no período compreendido em 2001-2004, assim como em dados de mesoescala para as ilhas que não foram alvos de medições reais.

O período de medição foi comum aos três locais e ocorreu durante doze meses, correspondendo ao intervalo de tempo entre 01 – Novembro 2001 – 30 Outubro 2002. Durante o referido período, os *data loggers* registaram a velocidade média do vento em intervalos de 10 minutos a uma altura de 31 metros do solo.

Os sensores utilizados, nos *sites* em questão, apresentavam características similares permitindo, assim, manter a coerência de medição entre os vários sites.

Quadro G4.1- Medições de vento¹⁰

Ilha	Site	Período de Medição	Altura do Sensor (mAGL)	Taxa de Registo de Dados (%)
Sal	Palmeira	Nov 01 – Out 02	31	99,3
Santiago	Monte S.Filipe	Nov 01 – Out 02	31	92
São Vicente	Selada de S.Pedro	Nov 01 – Out 02	31	98.8

Na Figura G4.5 estão apresentadas as variações sazonais baseadas na média mensais dos valores medidos em cada um dos sites.

¹⁰ Fonte: (Relatório *Risø*, 2002)

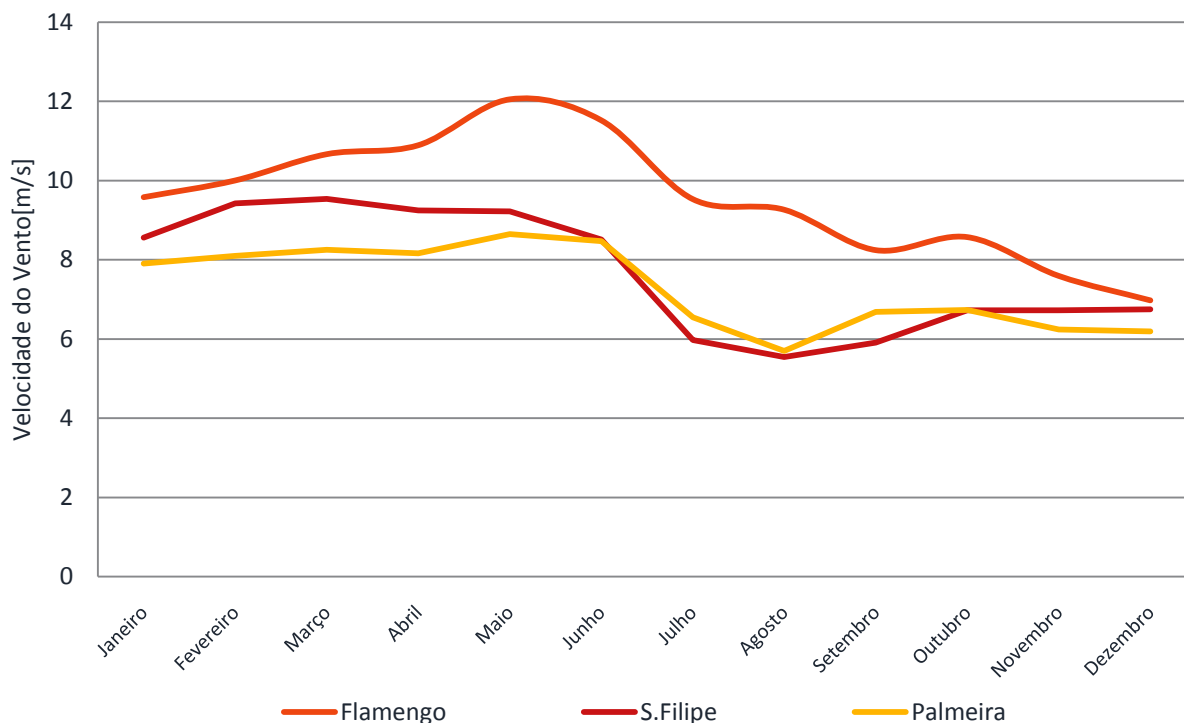


Figura G4.5 – Variação sazonal da velocidade do vento baseado nos dados medidos (Novembro 2001 – Outubro 2002)

Como previamente demonstrado, através do valor das taxas de registo de dados, ocorreram falhas de medição nos *data loggers*. Para completar os dados em falta, esses valores foram extrapolados através da replicação dos dados medidos para o período de tempo imediatamente anterior com a mesma dimensão temporal.

No Quadro G4.2 estão apresentados alguns intervalos de tempo cujos valores foram extrapolados, segundo o método já referido.

Quadro G4.2 - - Períodos tempo relativos aos dados de vento extrapolados¹¹

	Início	Fim
Sal	Junho -> Dia 24 1 Horas e 10 minutos	Junho -> Dia 26 12 Horas e 40 minutos
	Julho -> Dia: 23 1 Horas e 10 Minutos	Julho -> Dia: 24 2 Horas e 10 Minutos
Santiago	Julho -> Dia: 25 22 Horas e 30 Minutos	Julho -> Dia: 26 10 Horas e 0 Minutos
	Agosto -> Dia: 7 1 Horas e 0 Minutos	Setembro -> Dia: 3 15 Horas e 10 Minutos

¹¹ São apenas apresentados períodos de tempo relevantes. Períodos inferiores a 30 minutos não são apresentados no Quadro G4.2



	Início	Fim
São Vicente	Março -> Dia: 30 0 Horas e 40 Minutos	Março -> Dia: 30 6 Horas e 30 Minutos
	Maio -> Dia: 25 2 Horas e 30 Minutos	Maio -> Dia: 26 0 Horas e 0 Minutos
	Junho -> Dia: 24 10 Horas e 30 Minutos	Junho -> Dia: 24 13 Horas e 20 Minutos
	Junho -> Dia: 25 5 Horas e 10 Minutos	Junho -> Dia: 25 13 Horas e 10 Minutos
	Julho -> Dia: 8 16 Horas e 20 Minutos	Julho -> Dia: 8 23 Horas e 50 Minutos
	Agosto -> Dia: 15 0 Horas e 0 Minutos	Agosto -> Dia: 15 5 Horas e 10 Minutos
	Agosto -> Dia: 27 10 Horas e 0 Minutos	Agosto -> Dia: 27 15 Horas e 10 Minutos
	Dezembro -> Dia: 23 15 Horas e 40 Minutos	Dezembro -> Dia: 23 22 Horas e 20 Minutos

Como referido, os sensores que permitiram a medição e registo de dados de vento estavam a uma altitude de 31 metros em relação ao solo, permitindo estimar a variação do vento para a altura do *hub* da turbina a utilizar. O método mais utilizado para a estimativa da variação de velocidade de vento com a altura pode ser descrito por dois modelos matemáticos distintos: lei logarítmica e a lei de potência¹². A lei logarítmica é uma combinação de pesquisa teórica e empírica originada do fluxo da camada limite em dinâmica dos fluídos. Esta lei é usada para variação de velocidade de vento vertical modelada em uma condição de terreno particular. A lei logarítmica é determinada por (4.5).

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_{ref}/z_0)} \quad (4.5)$$

onde h_{ref} representa a altura de referência da medida da velocidade, v_{ref} a velocidade nesta altura de referência e z_0 é o comprimento de rugosidade¹³.

O valor de z_0 pode variar com a direcção da velocidade do vento e, ainda, entre os meses de verão e de inverno. Esses parâmetros devem ser levados em consideração quando se analisa a característica eólica de uma região. Dessa forma, (4.5) possui limitação representando apenas uma estimativa média do comprimento de rugosidade.

A lei de potência é um modelo semelhante à lei logarítmica que representa o perfil da velocidade do vento através da equação (4.6):

¹²Fonte: (Manwell, 2002)

¹³ O comprimento de rugosidade ou parâmetro de rugosidade z_0 é uma medida da rugosidade aerodinâmica da superfície sobre a qual o perfil da velocidade do vento é medido



$$v(h) = v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (4.6)$$

Onde α é chamado de expoente de camada limite e varia em função da rugosidade da superfície.

Será importante referir que ambas as leis são aplicadas para terrenos planos e homogêneos, ou seja, possuem limitações em relação à dependência do tipo de terreno, da velocidade do vento, modificações na rugosidade da superfície e também da influência de variáveis meteorológicas, como por exemplo, a temperatura do ar e pressão atmosférica.

Considerando os dados existentes, elegeu-se a lei da potência para estimar a variação de vento com a altura.

Quadro G4.3 – Velocidade média do vento para cálculo do expoente de camada limite¹⁴

	Sal	Santiago	São Vicente
Altura (mAGL)	Velocidade Anual Média (m/s)		
30 m	8,1	7,8	9,1
50 m	9	8,4	9,7

Recorrendo aos dados do Quadro G4.3 e resolvendo (4.6) em função de α , foi calculado o expoente da camada limite teórico de cada site (ilha).

Quadro G4.4 – Expoente de camada limite teórico

	Sal	Santiago	São Vicente
α	0,2063	0,1450	0,1245

A elevada eficiência e flexível configuração da turbina *Vestas V52* fazem desta uma excelente opção para todos os tipos de condições de vento. Além disso, graças às suas modestas dimensões a V52 é simples e rentável de transportar e instalar.

Desta forma, tendo sido considerada como opção otimizada para instalação em Cabo Verde, a *Vestas V-52*, foi possível eleger a altura do *hub* das máquinas a instalar. Assim, recorrendo novamente a (4.6), os valores expostos no Quadro G4.4 permitem o cálculo da velocidade (média dos referidos intervalos de 10 minutos) a uma altura de 49 metros (altura eleita para o *hub*).

Finalmente, para cálculo da potência média (no intervalo de 10 minutos), os valores da velocidade de vento ajustados para a altura do *hub*, foram projectados sobre a curva de potência da *Vestas V-52 – 850 kW* apresentada na Figura G4.6.

¹⁴ Fonte: (Relatório Final RisØ, 2007)

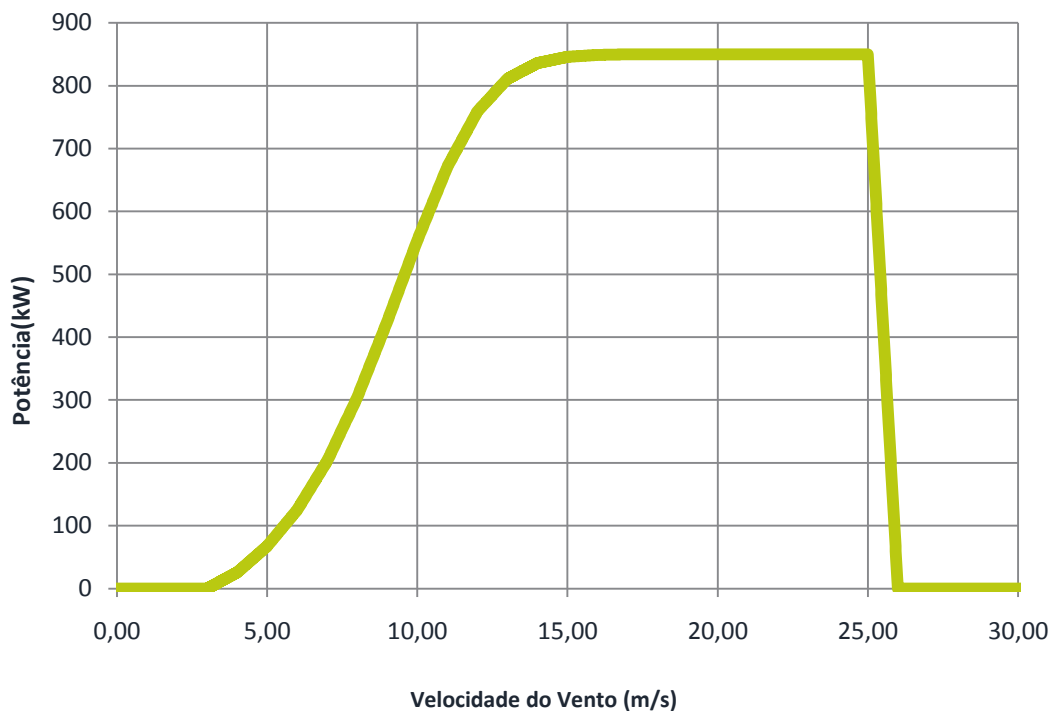


Figura G4.6 - Curva de potência - Vestas V52 - 850 kW

Após a computação dos 52.560 valores de potência (média em intervalos de 10 minutos) para cada ilha, foi estabelecida, a par do que foi apresentado na Figura G4.6, a curva de referência de produção. Esta curva permite calcular os valores de produção para parques eólicos com distinto número de turbinas V52 instaladas

Devido à inexistência de dados referentes a medições de velocidade de vento nas ilhas de Fogo, Santo Antão, Boavista, São Nicolau e Maio foi necessário introduzir novas variáveis que possibilitassem a extrapolação desses valores para os 52559 intervalos de 10 minutos anuais para as referidas ilhas

Fazendo referência ao número de horas equivalentes à potência nominal (NEPs) extraídos da mesoescala das ilhas que não foram alvo de medições e nos dados obtidos pelas medições da *RisØ* foram calculados os rácios entre os dados existentes e os pretendidos conforme a proximidade da ilha e respectiva direcção predominante do vento (4.7) entre a ilha *i* e a ilha *j*, correspondendo *i* à ilha cujos valores da curva de referência se pretende extrapolar e *j* correspondendo à ilha cuja curva foi obtida através de análise dos dados medidos.

Assim, calculando o valor médio das referidas NEPs de cada ilha foram calculados os rácios conforme o método descrito em (4.7)

$$RÁCIO = \frac{\sum NEP's_i}{N^{\circ} PROJ_i} \Bigg/ \frac{\sum NEP's_j}{N^{\circ} PROJ_j} \quad (4.7)$$

Quadro G4.5 - NEP's e Rácio NEP's para cálculo de curva de produção de referência

São Vicente			Santo Antão			
Projecto	NEP's	Média	Projecto	NEP's	Média	Rácio Médias
Pé de Verde	4391,1	4724,3	Lombo da Torre	2496,1	2311	0,489
Areia Branca	4414,7		João Daninha	2263,8		
João D'Évora	4554,1		Galheteiro	2034,5		
Santiago			Fogo			
Projecto	NEP's	Média	Projecto	NEP's	Média	Rácio Médias
Monte Leão	3200	3367,8	Cova Figueira	3254,6	2908	0,863
Rui Vaz	2764					
Achada da Mostarda	3081					
Montes Redondos	3789		Monte Ledo	2245,5		
Pedra Branca	4201					
Achada do Descanso	3435					
Forno	3200					
Monte Chaminé	3320					
Praia Baixo	2625,8					
São Vicente			São Nicolau			
Projecto	NEP's	Média	Projecto	NEP's	Média	Rácio Médias
Pé de Verde	4391,1	4724,3	Jalunga	3216	2311	0,670
Areia Branca	4414,7		Praia Branca	3118		
João D'Évora	4554,1					
Santiago			Maio			
Projecto	NEP's	Média	Projecto	NEP's	Média	Rácio Médias
Monte Leão	3200	3367,8	Batalha	2190	2190	0,650
Rui Vaz	2764					
Achada da Mostarda	3081					
Montes Redondos	3789					
Pedra Branca	4201					
Achada do Descanso	3435					
Forno	3200					
Monte Chaminé	3320					
Praia Baixo	2625,8					
Sal			Boavista			
Projecto	NEP's	Média	Projecto	NEP's	Média	Rácio Médias
Currallona	2715	2772,3	Mesa	2993	2922,25	0,949
Cascanhal	2715		Chão de Pico Forcado	2846		
Socorro	2632		Falcão	3004		
Serra Negro	3027		Caçador	2846		



4.1.4 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS A SIMULAR

Após a modelação dos dados de entrada, torna-se necessária a definição das características dos cenários que se pretende analisar referentes ao ano escolhido.

4.1.4.1 SISTEMAS DE GERAÇÃO TÉRMICA

A definição dos grupos térmicos disponíveis tem em conta o plano de expansão do parque electroprodutor da ELECTRA.

A definição dos grupos a utilizar requer a sua descrição, nomeadamente:

- Potência nominal (kW);
- Tipo de combustível (Fuel ou Gasóleo);
- Mínimo técnico (dependendo do tipo de combustível):
 - Fuel: 40%
 - Gasóleo: 30%;

- Máximo Técnico (dependente da idade do grupo);
 - 100%: Idade <8 anos;
 - 90% Idade >= 8 anos;
- Ano de colocação em serviço;
- Ordem de mérito (definida à posteriori pelo utilizador):
 - Potência nominal;
 - Tipo de combustível;
 - Idade.

Comum a todos os grupos, é definido o número de períodos de 10 minutos para decisão do despacho térmico, *i.e.* qual o intervalo de tempo entre o qual é realizada a decisão de quais os grupos térmicos que irão funcionar até nova decisão de despacho. Após validação junto da ELECTRA e do INESC, foram definidos doze períodos (2 horas) para decisão do despacho térmico

Esta definição permite realizar o despacho térmico de forma otimizada, respeitando as limitações dos grupos existentes.

4.1.4.2 SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL E ARMAZENAMENTO

O modelo *SIMRES*[®] permite a integração de diversas fontes de energia renovável e de armazenamento de energia, especificamente:

- Sistemas de Conversão de Energia:
 - Solar Fotovoltaica (SPV);
 - Eólica (aerogeradores);
 - Resíduos Sólidos Urbanos (combustão de RSU);
- Sistemas de Armazenamento de Energia:
 - Hídrica (bomagem-pura);
 - *Flywheels*;

Analogamente aos grupos térmicos, é necessário caracterizar os referidos sistemas.

- Nome do Projecto;
- Índice de curva de produção (associar o tipo de projecto à curva de produção respectiva);
- Potência nominal (kW);
- Nº máquinas/unidades;



- Potência unitária;
- Número de horas equivalente à potência nominal (NEPs);

As NEPs de cada projecto (eólico ou solar) serão alvo de comparação com as NEPs de referência (retiradas da curva de produção de referência). Essa comparação permitirá majorar ou minorar a curva de produção, consoante o número seja superior ou inferior.

Especificamente em relação aos projectos de energia solar, devido a restrições da rede, o *SIMRES*[®] permite a parametrização da limitação ao deslastre (foi parametrizado nas simulações realizadas que potência a deslastrar teria que ser igual ou inferior a 5% da carga total instantânea)

O *SIMRES*[®] permite também parametrizar, para o sistema de combustão de RSU, a limitação de deslastre em função da relação da energia renovável disponível sobre a carga naquele momento (foi parametrizado)

A maior complexidade do despacho do sistema de bombagem-pura promove a necessidade de um maior número de parâmetros.

- Perfil de funcionamento dos grupos (por mês):
 - Nº grupos em funcionamento durante a semana (nº de grupos instalados);
 - Nº grupos em funcionamento durante o fim-de-semana (nº de grupos instalados);
- Eficiência global (sistema bomba-turbina): 75%;
- Nível de operação de turbinamento: 80%;
- Mínimo de operação da bombagem com eficiência: 40%;
- Perda global de eficiência: 10%;
- Dimensão do reservatório (kWh bombagem);
- Nº de períodos de bombagem: 60 (10*6 minutos).

A enunciação dos parâmetros apresentados permite a correcta definição do princípio de funcionamento da bombagem.

A modelização das *flywheels* é realizada de forma indirecta. Estas podem ser definidas através da redução da margem de reserva girante (até 40 % das renováveis em utilização) e sinalizando-se assim a existência de um sistema de *Flywheels + Fuel* (correspondendo nestes casos a potência nominal das *flywheels* a 50 % da ponta) que permitem o *cold-start* dos grupos geradores. A outra hipótese para definição das *flywheels* é através do aumento do limite de integração de renováveis (80 % sem bombagem/75 % com bombagem) que permitem o *cold-start* até 50 % P_N dos grupos hídricos.

4.1.4.3 SISTEMA ELÉCTRICO (EXCLUINDO PARQUE ELECTROPRODUTOR)

Como anteriormente referido, os diagramas de carga de referência foram estimados partindo dos dados presentes nos diagramas de carga típicos de 2007. É por isso necessário, adaptar os diagramas de carga para o ano referente ao cenário em questão. Tal adaptação é realizada recorrendo aos dados de consumo obtidos na análise Gesto¹⁵ e ao consumo anual calculado através do diagrama de carga anual estimado para 2007 segundo os métodos anteriormente descritos.

¹⁵ Plano Energético Renovável de Cabo Verde



Quadro G4.6 - Consumo Anual e Factor de Adaptação

	2007		2012		2015		2020	
	Consumo	<i>k</i>	Consumo	<i>k</i>	Consumo	<i>k</i>	Consumo	<i>k</i>
	[MWh/ano]		[MWh/ano]		[MWh/ano]		[MWh/ano]	
Santiago	131.790.991	-	208.708.245	1,584	247.221.903	1,876	313.310.370	2,377
São Vicente	60.968.802	-	72.198.955	1,184	84.043.547	1,378	107.658.883	1,766
Sal	38.783.786	-	47.150.450	1,216	57.488.763	1,482	86.320.891	2,226
Santo Antão	11.060.202	-	14.172.196	1,281	17.148.266	1,550	22.716.705	2,054
Fogo	8.226.016	-	12.753.817	1,550	15.125.035	1,839	20.196.885	2,455
Boavista	5.049.539	-	35.817.675	7,093	61.861.014	12,251	97.559.908	19,321
São Nicolau	4.669.575	-	4.944.621	1,059	5.418.205	1,160	6.398.329	1,370
Maio	2.233.218	-	4.750.403	2,127	7.310.750	3,274	12.767.579	5,717

O factor de adaptação *k*, permite o cálculo da produção em cada um dos intervalos de 10 minutos adaptado para o ano em questão (4.8).

$$P_{instantânea(média\ do\ 10\ minutos)} = P_{instantânea(média\ do\ 10\ minutos)\ referência} * k \quad (4.8)$$

Como apresentado no subcapítulo 3.3, existem limitações técnicas do sistema eléctrico que necessitam parametrização.

É necessário para o correcto funcionamento da rede (estabilidade da rede) a definição do valor da margem de reserva girante. Após validação junto da ELECTRA e do INESC considerou-se 60 % da produção renovável para casos normais e, como já referido anteriormente, a redução deste valor para 40 % aquando da existência de um sistema de *flywheels+diesel*.

O SIMRES® permite também a definição do limite de integração de renováveis. De forma a controlar as variações de frequência e tensão na rede, e de acordo com a análise do INESC, foi definido um limite de integração de renováveis de 65 % e 70 % da carga em cenários sem *flywheels* e, respectivamente, com e sem bombagem e, 75 % e 80 % em cenários com *flywheels*, respectivamente, com e sem bombagem.

4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Conforme referido, as simulações realizadas foram baseadas nos dados resultantes dos estudos dos recursos renováveis avaliados, tendo sido analisado um período de um ano de calendário (1 de Janeiro a 31 de Dezembro) em períodos de 10 min¹⁶.

O modelo tem em linha de conta as limitações técnicas das unidades de produção (mínimos técnicos, tempos mínimos de paragem, tempos de arranque, entre outros.), a disponibilidade de recurso, assim como as já apresentadas restrições do sistema (necessidade de reserva girante, seguimento da curva de carga, limite de integração de renováveis, entre outros).

¹⁶ Limitação imposta pelos dados de vento existentes (RISØ)

O *SIMRES*® possibilita, assim, além da calendarização da operação das unidades de produção ao longo de determinado período de tempo, a obtenção de resultados extremamente relevantes para a avaliação dos projectos, tais como, o número de horas marginais, o rácio de integração de renováveis durante o período total e, por tecnologia, e o desperdício *i.e.* o excesso de energia renovável disponível que não foi injectado na rede.

Na Figura G4.7, encontra-se representado o diagrama conceptual que descreve o funcionamento do modelo *SIMRES*® que, em conjunto com o Quadro G4.7 e Quadro G4.8, descreve os princípios analíticos que regem o funcionamento do modelo.

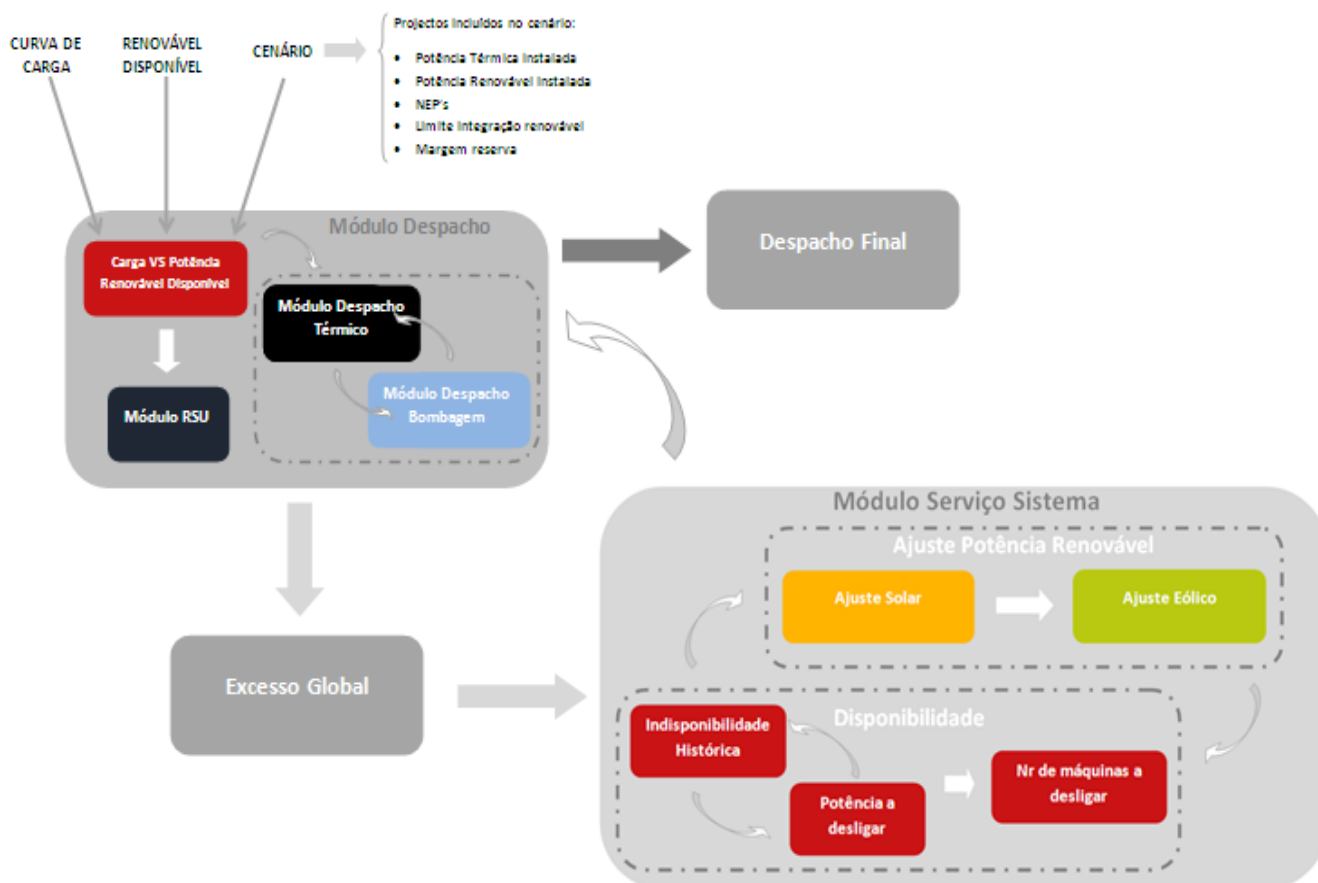


Figura G4.7- Diagrama de funcionamento *SIMRES*®

O modelo *SIMRES* consagra entre diversos parâmetros dois grandes módulos, *Despacho* e *Serviço Sistema*, subdivididos em diversos sub-módulos. No módulo de despacho existe um sub-módulo que define o funcionamento das unidades de produção baseada em RSU, o qual está directamente dependente da relação entre a potência renovável disponível e a carga.

O módulo que engloba os sub-módulos de despacho de bombagem e grupos térmicos está, não só dependente das relações entre si, como também dependente da potência renovável disponível e a carga. Estes realizam tomadas de decisão de forma iterativa considerando as restrições e princípios apresentados nos quadros já mencionados.

Deste módulo (*Despacho*), resulta o excesso global de RES disponível. Este excesso será por sua vez analisado no Módulo de Serviço de Sistema.



O Módulo de Serviço de Sistema permite o ajuste das unidades de produção renovável solar e eólica, de forma a adaptar a produção global à carga. Este módulo está subdividido em dois sub-módulos principais, módulo de ajuste potência renovável e de disponibilidade, que por sua vez se subdividem em dois e três sub-módulos, respectivamente. O resultado deste módulo (*Serviço Sistema*) é novamente analisado no primeiro módulo (*Despacho*), onde serão realizados ajustes, se necessário, à produção térmica e operação da bombagem para que a produção global apresente exactamente o mesmo valor que a carga.

Quadro G4.7 - Limitações do Sistema

Limites de Integração					
Sistema com bombagem				Sistema sem bombagem	
Sistema com <i>flywheels</i>		Sistema sem <i>flywheels</i>		Sistema com <i>flywheels</i> +térmico	Sistema sem <i>flywheels</i>
Sistema bombagem parado	Sistema bombagem funcionamento	Sistema bombagem parado	Sistema bombagem funcionamento		
80%	75%	70%	65%	80%	70%
Curva de Carga					
Limitação dependentemente da curva de carga da respectiva ilha baseado na análise GESTO de evolução da procura.					
Reserva Girante					
Sistema <i>flywheels</i> +térmico sem bombagem		Sistema sem <i>flywheels</i> (com e sem bombagem)		Sistema com <i>flywheels</i> (com e sem bombagem)	
40%		60%		60%	

No Quadro G4.8 apresentam-se alguns dos parâmetros que, em conjunto com os já apresentados para o sistema eléctrico, permitem definir o funcionamento de todo o modelo.

Quadro G4.8 – Parâmetros das Unidades de Produção

Unidades de Produção	
Sistemas de Conversão de Energia Renovável	
Solar Fotovoltaica (SFV)	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade do Recurso • Unidade mínima de deslastre (Posto de Transformação) • Tempo mínimo (deslastre/operação): 30 minutos • Prioridade na ordem de deslastre renovável • Limitação ao deslastre (potência a deslastrar $\leq 5\%$ da carga total instantânea)
Eólica (aerogeradores)	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade do Recurso • Tempo mínimo (deslastre/operação): 30 minutos
Resíduos Sólidos Urbanos (combustão de RSU)	<ul style="list-style-type: none"> • Gama de funcionamento: a 95 % ou 50 % da potência nominal • Funcionamento a 50 % P_N: quando (RES disponível/Carga) $> 50\%$
Sistemas de Geração Térmica	
Grupos Gasóleo	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo Técnico: 30 % P_N • Máximo Técnico para grupos idade > 8 anos: 90 % P_N • Determinação otimizada (análise de todas as combinações possíveis entre grupos disponíveis) de colocação/retirada de serviço da bomba: de 2 em 2 horas • Tempo mínimo (deslastre/operação): 2 horas
Grupos Fuel	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo Técnico: 40% P_N • Máximo Técnico para grupos idade > 8 anos: 90% P_N • Determinação otimizada (análise de todas as combinações possíveis entre grupos disponíveis) de colocação/retirada de serviço da bomba: de 2 em 2 horas • Tempo mínimo (deslastre/operação): 2 horas
Sistemas de Armazenamento de Energia	
Hídrica (bombagem-pura)	<ul style="list-style-type: none"> • Limitação da capacidade dos reservatórios • Período de bombagem pré-determinado no início de cada dia • Turbinamento forçado para garantir caudal diário para bombagem • Determinação colocação/retirada de serviço da bomba: de 2 em 2 horas (decisão tendo em conta as 2 horas seguintes) • Tempo de arranque: 30 segundos – 0 -> 50% P_N • Determinação colocação/retirada de serviço da turbina: sempre que necessário



Flywheels	<ul style="list-style-type: none">• Tempo de funcionamento: 15 segundos a P_N e 35 segundos a 50 % P_N• Permite o <i>cold-start</i> de até 50 % de turbinas (bombagem) ou <i>cold-start</i> de grupos térmicos
------------------	---

Como anteriormente referido, um dos *outputs* do modelo é o número de horas marginais, que representa o número de horas de produção eólica que realmente são injectadas na rede.

- *HR* - Horas marginais;
- *EER* – Produção eólica real;
- *EBR* – Produção sistema de bombagem real;
- *ESR* – Produção solar real;
- *NEPs S* – Número de horas equivalentes à potência nominal solar;
- *NEPs E* - Número de horas equivalentes à potência nominal eólica;
- *PIS* Potência instalada solar;
- *PIE* – Potência instalada eólica.

Outros já supracitados *outputs* do modelo são:

- Integração potencial de renovável (IRP): % de renovável potencialmente injectada na rede (se não existissem restrições) face à carga;
- Integração real de renovável (IRR): % de renovável real injectada na rede face à carga.

$$IRP = \frac{\sum EER + \sum EBR + \sum ESR}{Carga} \quad (4.9)$$

$$IRR = \frac{(NEPs E * \sum PIE) + (NEPs S * \sum PIS)}{Carga} \quad (4.10)$$

Todos estes resultados permitiram, posteriormente, analisar o custo associado às diversas tecnologias utilizadas e, consequente, possibilitaram a avaliação da viabilidade económica dos projectos propostos em cada cenário simulado através do cálculo dos LCOEs.

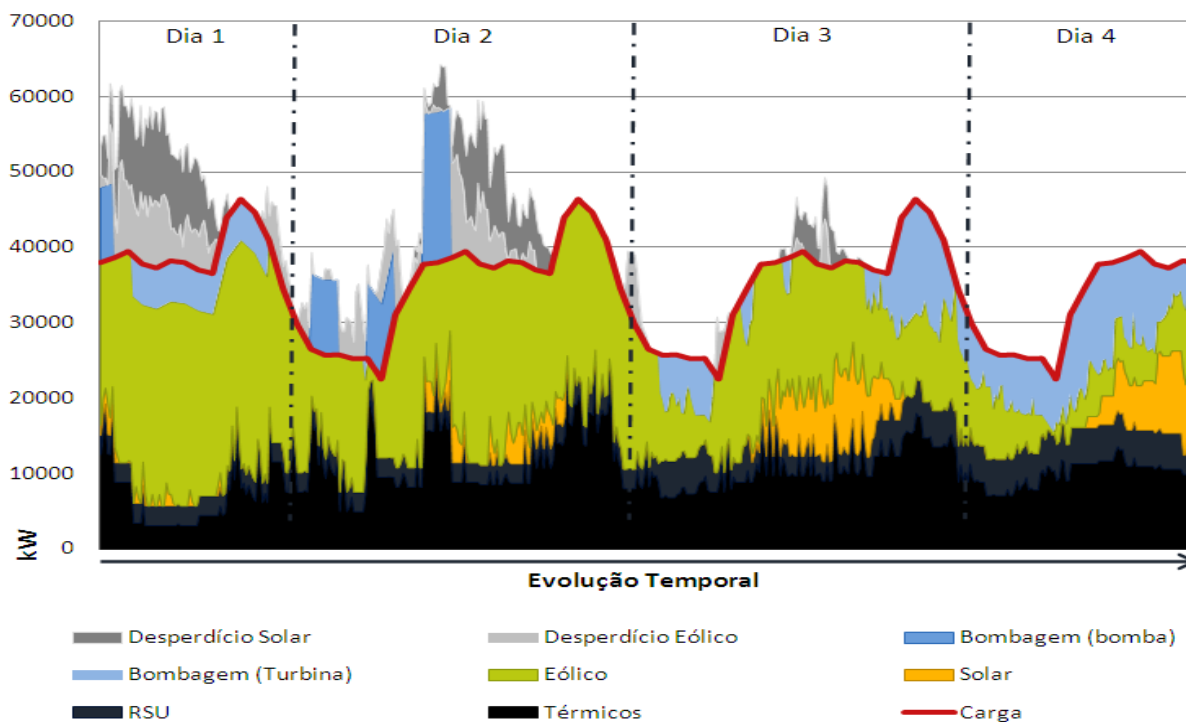
4.2.1 EXEMPLO DE FUNCIONAMENTO

A Figura G4.8 apresenta, a título de exemplo, alguns resultados da simulação no modelo SIMRES® para um determinado período e tempo (aproximadamente 3 dias) para a ilha de Santiago. Estes resultados permitem verificar os princípios de funcionamento atrás descritos.

O cenário considerado prevê uma integração de energia renovável superior a 50 % da carga em 2020 com recurso a:

- 48,45 MW de potência eólico instalada,

- 15 MW de potência solar instalada,
- 5 MW de potência RSU instalada,
- 20 MW de bombagem,
- 10 MW de *flywheels*: 30 segundos a 50 % P_N grupos de bombagem



• **Figura G4.8 - Resultados SIMRES[®] - Santiago 2020 – Cenário Integração 50% Renovável**

Na Figura G4.8 é possível observar a combinação instantânea de unidades produtoras, otimizada pelo modelo SIMRES[®].

O digrama de carga, representado a vermelho, apresenta marcadamente os vários regimes diários (*vazio*, *cheia* e *ponta*) do diagrama de carga.

Analisando o referido gráfico, é possível verificar:

- **Dia 1:** No início do período de *cheia/fim* do *vazio* do primeiro dia ocorre um período de bombagem que permite repor o nível do reservatório superior para posterior turbinamento. A necessidade de turbinar durante as horas de *ponta* (decorrente da limitação tanto do recurso solar como eólico), traduz-se no turbinamento ainda durante a *cheia*, visto a decisão de turbinar ser tomada com referência às duas horas seguintes.
- **Dia 2:** Durante o *vazio* e início da *cheia* ocorrem 3 períodos de bombagem que permitem repor o nível do reservatório superior. A energia dispendida nesta operação é conseguida através de energia renovável excedentária uma vez que neste período estão disponíveis recursos superiores à carga (azul escuro). Devido às restrições anteriormente apresentadas, nomeadamente a decisão de colocação/retirada de serviço dos grupos térmicos ser



realizada de 2 em 2 horas e a prioridade na ordem de deslastre das unidades de produção, verifica-se que um deslastre total das unidades de produção fotovoltaica¹⁷ durante alguns períodos de tempo.

- **Dia 3:** Durante o período de *vazio*, e dada a reduzida disponibilidade de energia renovável, verifica-se um turbinamento do volume armazenado no reservatório, aproveitando a energia renovável excedentária aí armazenada. Verifica-se também que durante o período de *cheia*, o aumento da produção renovável (essencialmente solar) permite desligar a turbina. Durante o período de *ponta*, uma vez que o reservatório superior ainda apresenta um volume de água que permite o turbinamento, é novamente utilizada a turbina para compensar a drástica redução do recurso solar assim como alguma redução do recurso eólico.
- **Dia 4:** No período apresentado e tal como no dia anterior, devido à reduzida disponibilidade de recurso renovável e à existência de volume de água suficiente no reservatório superior, verifica-se a utilização da turbina, compensando a necessidade de produção com recurso a energia renovável excedentária armazenada nos dias anteriores.

¹⁷ Este desperdício ocorre apenas devido às limitações do modelo SIMRES® podendo ser corrigido aquando do projecto do centro de despacho.



Gesto

ENERGY SOLUTIONS

Av. Cáceres Monteiro, nº 10, 1º Sul

1495-131 Algés, Portugal

T. +351 211 544 640

F. +351 211 544 648

www.gestoenergy.com

A PART OF
MARTIFER