

## Otimizador de limitação de geração em Centros de Operação de plantas eólicas

Bruno Pires de Campos<sup>1</sup>, Waldemar Alvares Rezende<sup>2</sup>

Automalógica, AWR Energia

bruno.campos@automalogica.com.br, waldemar@awrenergia.com.br

### RESUMO

Este trabalho apresenta o otimizador de limitação da Automalógica aplicado em um COG de planta eólica para atender restrições de geração impostas pelo ONS. A solução é desenvolvida em plataforma SCADA Elipse, visando a diminuição de perdas energéticas e a agilidade na definição dos limites de geração em cada PPC de um ou mais complexos eólicos.

### Palavras-chaves:

Geração eólica; SCADA; Centro de operação; Otimizador de limitação; PPC.

### ABSTRACT

This paper presents the Automalógica limiting optimizer applied in a wind plant COG to meet generation constraints imposed by ONS. The solution is developed in SCADA Elipse platform, aiming to reduce energy losses and to define generation limits in each PPC of one or more wind complexes.

### Keywords:

Wind power Generation; SCADA; Operation center; Limitation optimizer; PPC.

## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente inclusão de geração eólica e solar na matriz energética brasileira, está cada vez mais comum a imposição de cortes de geração por parte do Operador Nacional do Sistema (ONS). Esses cortes são necessários em momentos de picos de geração que acabam sobrecarregando o Sistema Interligado Nacional (SIN). A sobrecarga prolongada de potência ativa pode comprometer a qualidade da energia da rede [6], elevando a tensão fora dos limites aceitáveis. Se o pico for prolongado pode resultar no aumento da temperatura do cabeamento e possível rompimento, em danos a equipamentos conectados na rede etc.

Nos períodos de restrição, quem sai perdendo são os agentes que tem sua geração limitada e em muitos casos zerada. O único modo de diminuir as perdas é gerar o mais próximo possível do limite imposto pelo ONS. E essa tarefa geralmente fica sob responsabilidade dos operadores das usinas, que enviam os limites necessários aos equipamentos PPC (do inglês Power Plant Controller) através de *setpoints* no sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). O ONS pede uma limitação em pontos de conexão específicos da rede. A questão é que em um ponto de conexão podem estar conectados vários parques eólicos, e coordenar a limitação nesses parques para atender à limitação total necessária é uma

tarefa desafiadora por vários motivos. Os operadores de um COG (Centro de Operação da Geração) normalmente operam várias usinas simultaneamente. Com a entrada de usinas solares e eólicas, a quantidade de pontos monitorados no sistema SCADA aumenta significativamente, principalmente porque uma única planta pode conter centenas de aerogeradores e cada gerador tem outras centenas de pontos de monitoramento. Quantidades bem maiores quando comparadas a supervisão da tradicional geração hídrica, com no máximo dezenas de unidades geradoras por planta. Isso tudo leva a um aumento da carga de trabalho sobre os operadores, que devem monitorar muito mais informação para garantir uma operação segura e eficiente dos ativos sob sua responsabilidade.

Outro ponto que dificulta o trabalho da operação durante restrições de geração é que um complexo eólico muitas vezes possui mais de um ponto de controle. Cada ponto de controle é um parque eólico com um PPC que deverá receber um *setpoint* de potência ativa, representando maior número de interações do operador com o sistema SCADA.

Considerando-se que a velocidade de vento varia constantemente entre os parques de um complexo e conseqüentemente a capacidade de geração de cada parque, é impraticável que o operador consiga restringir a produção energética refletindo essas variações na limitação escolhida para cada parque eólico, de modo que cada parque fosse limitado de acordo com sua capacidade de geração no momento da limitação. Seria ainda mais desafiador caso o operador precisasse levar em conta que o preço da energia (PLD) pode ser diferente entre os parques em restrição e que esse preço pode variar hora a hora e isso também tem influência na limitação ótima.

É por tudo isso que se faz necessário uma solução que gerencie de maneira ótima a limitação imposta pelo ONS. A ferramenta apresentada é o Otimizador de limitação desenvolvido pela empresa Automalógica. O objetivo da ferramenta é oferecer um controle de potência ativa ágil e eficiente nos períodos de restrição de geração, de modo a limitar a geração o mais próximo possível do limite imposto pelo ONS e assim diminuir as perdas decorrentes dessas restrições.

## 2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### COG

O COG tem como principal responsabilidade supervisionar e controlar as usinas sob sua responsabilidade. O objetivo é operar as plantas da maneira mais segura e eficiente possível, rentabilizando ao máximo os recursos de geração. Quem executa essa função são os operadores através de sistemas SCADA.

O termo SCADA vem do inglês Supervisory Control and Data Acquisition. É um software de controle supervísório e aquisição de dados que fornece medições de tempo real do sistema através da aquisição de dados de concentradores como IEDs (do inglês intelligent electronic device), CLP (controlador lógico programável) ou relés. Os dados adquiridos são exibidos graficamente em telas de supervisão que representam o funcionamento da planta real [1].

As principais funções do sistema SCADA são [2]:

- 1) Aquisição de dados: Os IEDs concentram informações sobre o estado de equipamentos (como abertura ou fechamento de disjuntores), medição de sensores (temperaturas, potência, tensões, correntes etc.) e enviam esses dados ao SCADA através de protocolos de comunicação;
- 2) Gerenciamento de eventos e alarmes: Através da comparação de medições reais com faixas de valores consideradas normais, são gerados alarmes de medições analógicas. Alarmes ou eventos digitais são ativados em função de atuações nos próprios equipamentos de campo, como a abertura de um disjuntor ou indisponibilidade de um aerogerador;
- 3) Controle: Através do SCADA são enviados comandos e *setpoints* para controlar os equipamentos de campo como partida/parada de um aerogerador, abertura/fechamento de chave e disjuntores da subestação, limitação de potência em um PPC etc.;
- 4) Armazenamento: Cada variável analógica, alarme, evento, comando ou *setpoint* podem ser armazenados em ordem cronológica em banco de dados, possibilitando posterior análise sequencial de

ocorrências. Ou estudos mais sofisticados como previsão de falhas em equipamentos ou previsão de demanda de energia, por exemplo [5].

A aplicação SCADA COG é comumente conhecida como N3 (nível 3). O termo denota que abaixo do N3, existem o N2 (nível 2) e o N1 (nível 1). O N2 é uma aplicação SCADA local destinada à equipe de mantenedores da planta. O N1 é composto pelos equipamentos de campo (sensores, geradores, concentradores etc.). O N2 adquire informações do N1. Essa aquisição se dá através da comunicação entre N2 e N1 por protocolos de comunicação como Modbus, DNP3, IEC61850 etc. O COG é a integração de várias aplicações N2 em uma aplicação N3. Através do COG é possível operar remotamente várias plantas em uma única aplicação SCADA. Cada N2 é responsável por concentrar as informações da planta monitorada e enviar ao COG também através de protocolos de comunicação como IEC-104, DNP3 etc.

Existe ainda um quarto nível de supervisão responsável por garantir o equilíbrio do SIN (Sistema Interligado Nacional), balanceando geração e demanda. É o nível do ONS (Operador Nacional do Sistema) que é o maior e mais complexo centro de operação do Brasil e coordena os vários centros de operação. Quando a geração começa a exceder a demanda, o sistema pode ficar desequilibrado levando ao aumento de tensão em picos de geração. Isso pode causar desligamentos e prejudicar o funcionamento de equipamentos ligados à rede. Por isso, nesses momentos, o ONS pode exigir a restrição de geração ou mesmo o desligamento de fontes de geração. O ONS comunica as restrições aos COGs, que serão responsáveis por limitar suas fontes. Caso a concessionária não respeite o limite imposto pelo ONS, penalidades serão aplicadas, que podem variar desde multas até a proibição de geração.

No caso de plantas eólicas, a limitação de geração é feita através do envio de *setpoints* de potência aos PPCs que por fim controlam a potência de grupos de aerogeradores sob seu controle.

### PPC

O PPC é responsável por controlar a potência total de um grupo de aerogeradores em um patamar pré-definido. O PPC consiste em um CLP que roda algoritmos de loop fechado para controlar medições elétricas do ponto de conexão da planta com a rede elétrica. Um PPC deve ser capaz de controlar a potência ativa, potência reativa, tensão e/ou fator de potência da usina eólica. O controle de potência ativa será o foco deste trabalho. O PPC age como um mestre que define a potência em cada aerogerador do parque. O aerogerador, por sua vez, tem seu próprio loop de controle para obedecer ao que lhe foi definido pelo PPC. O somatório da potência de todos os aerogeradores é mensurado por um medidor de potência no ponto de conexão, essa medição é o feedback para o algoritmo do PPC que avalia se deve aumentar, diminuir ou manter a potência dos aerogeradores controlados [3].

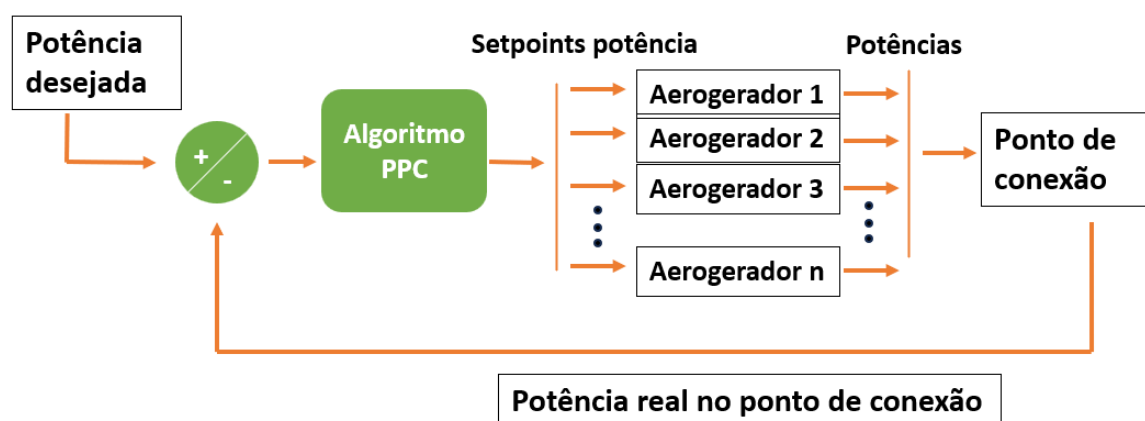


Figura 1. Fluxograma PPC

Por definição do ONS, toda planta eólica deve possuir um PPC [4]. Para a concessionária, o ideal seria gerar sempre o máximo de potência possível, porém o ONS pode impor limitações de potência buscando o equilíbrio do SIN.

A sequência da ação de limitação se resume assim:

1. ONS liga para o operador COG exigindo a limitação em uma ou várias plantas;
2. O operador do COG decide qual o limite de potência em cada um dos parques sob seu controle para atender à requisição do ONS;
3. Através do SCADA do COG, o operador envia os *setpoints* de potência ativa para cada parque para o SCADA da planta;
4. O SCADA local da planta eólica repassa o *setpoint* recebido para os PPCs dos parques eólicos;
5. Os PPCs controlam a potência dos aerogeradores para atingir o limite de geração imposto.

### 3. MÉTODO DO ESTUDO

A solução proposta funciona em arquitetura mestre/escravo. O mestre recebe o limite inserido pelo operador do sistema, executa o cálculo de limitação ótima para cada escravo e faz a distribuição do *setpoint* calculado em cada escravo. O escravo, por sua vez é o responsável por receber a limitação calculada pelo mestre e enviar ao PPC que controla a potência dos aerogeradores do parque eólico. Cada PPC representa um escravo no otimizador de limitação.

Essa arquitetura pode ser expandida em quantos níveis forem necessários. Na base estão os escravos, os mestres ficam nos níveis superiores. Dependendo da necessidade, é possível existir vários níveis de mestre. De maneira que o mestre em um nível inferior se torna um escravo do mestre de nível acima.

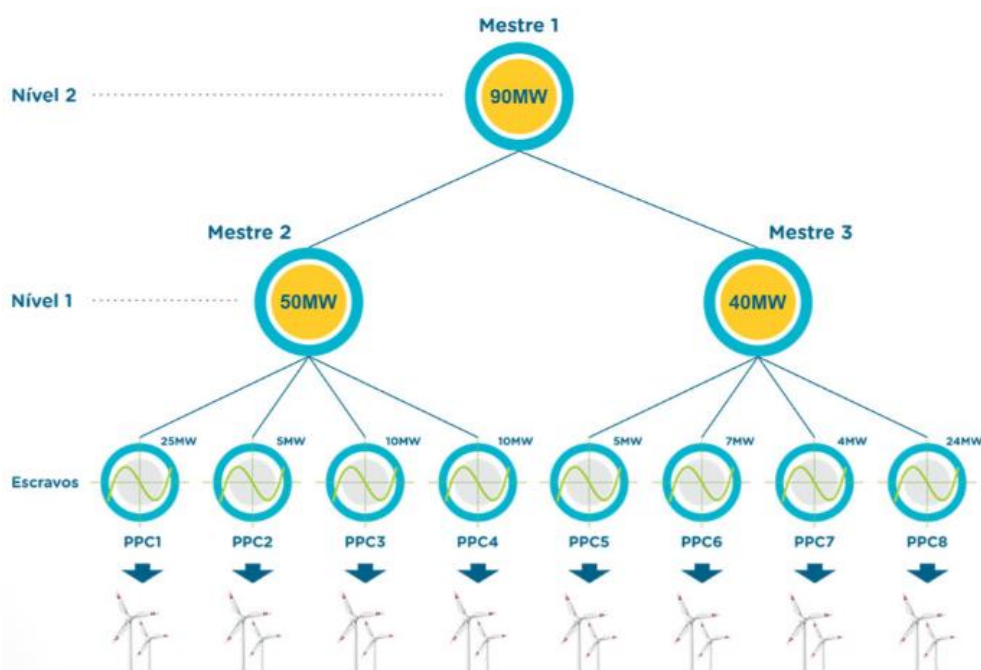


Figura 2. Arquitetura do otimizador de limitação [7]

#### Algoritmo

O algoritmo é baseado primeiramente na potência esperada de cada PPC. A potência esperada vem da curva de potência do aerogerador, para cada velocidade do vento e densidade se tem uma potência ativa correspondente. Normalmente essa informação é exibida na especificação do aerogerador. Essa é a medida de capacidade de geração de cada PPC e é com base nela que o algoritmo do otimizador calcula a limitação ótima em cada parque eólico. De modo que parques que tem maior potência esperada, com

maiores velocidades de vento, receberão limites mais altos (e por isso irão gerar mais) em comparação com os parques com menores potências esperadas. O cálculo de distribuição é feito de maneira cíclica para que se leve em conta as variações de vento em cada período.

Outro fator que pode ser levado em consideração na distribuição de limitação em cada parque é o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), ou seja, o preço da energia. Nesse caso é possível atribuir uma prioridade em cada parque considerando o retorno monetário. Parques que tem PLD mais alta serão menos limitados (terão limites mais altos) em comparação com parque que tem PLD mais baixa.

### Método manual vs Otimizador de limitação

Apresenta-se aqui uma simulação didática comparando-se o método manual em que o operador decide a limitação em cada parque e o método do otimizador de geração desenvolvido pela Automalógica. Também será comparado os dois modos de operação do otimizador de limitação, o modo de distribuição equilibrado e o modo de distribuição por prioridade. Nessa simulação está sendo considerado um complexo eólico com 3 parques com mesma potência nominal.

#### Cenário I

É um cenário sem limitação em que cada parque está gerando o máximo possível de acordo com a velocidade de vento presente em cada um. Nessa situação a geração atual é a mesma da geração esperada, pois a limitação está zerada em todos os parques. Nesse cenário o complexo eólico está gerando um total de 100 MW.

	Parque 1	Parque 2	Parque 3	Total
<b>Geração atual (MW)</b>	50	30	20	100
<b>Geração esperada (MW)</b>	50	30	20	100
<b>Limitação (MW)</b>	0	0	0	0

Tabela 1. Geração e limitação de potência Cenário I

#### Cenário II

É o cenário em que o ONS faz uma requisição de limitação para 90 MW e a distribuição será feita manualmente pelo operador do sistema SCADA. Nesse caso a prática comumente adotada é a distribuição média entre os parques. Ou seja, a limitação de 90 MW será dividida igualmente entre os 3 parques, resultando em uma limitação de 30 MW em cada parque.

	Parque 1	Parque 2	Parque 3	Total
<b>Geração atual (MW)</b>	30	30	20	80
<b>Geração esperada (MW)</b>	50	30	20	100
<b>Limitação (MW)</b>	30	30	30	90

Tabela 2. Geração e limitação de potência Cenário II

Nesse cenário, o parque 1 que era capaz de gerar 50 MW foi limitado em 30 MW e passou a gerar os 30 MW. O parque 2 que estava gerando 30 MW, foi limitado em 30 MW, continuou gerando 30 MW. O parque 3 que estava gerando 20 MW, foi limitado em 30 MW, continuou gerando 20 MW. Ao final da limitação manual a soma das limitações ficou em 90 MW, porém a soma da geração real ficou em 80 MW, ou seja, 10 MW de perda em relação aos 90 MW imposto pelo ONS.

#### Cenário III

Nesse cenário o otimizador fará a distribuição no modo equilibrado. O objetivo desse modo é deixar os parques na geração mais próxima possível um do outro, porém respeitando a geração esperada em cada parque.

	Parque 1	Parque 2	Parque 3	Total
<b>Geração atual (MW)</b>	40	30	20	90
<b>Geração esperada (MW)</b>	50	30	20	100
<b>Limitação (MW)</b>	40	30	20	90

Tabela 3. Geração e limitação de potência Cenário III

Nesse modo o algoritmo primeiramente distribui a média de 30 MW de limitação entre os parques, porém entende que o parque 3 não é capaz de gerar 30 MW, somente pode gerar 20 MW de acordo com sua geração esperada. Os 10 MW que sobram do parque 3 são distribuídos para os parques com maiores capacidades de geração, nesse caso o parque 1.

Desse modo a geração final ficaria exatamente no mesmo patamar de 90 MW imposto pelo ONS.

#### Cenário IV

Nesse cenário o otimizador fará a distribuição no modo por prioridade. Nesse modo cada um dos parques tem um valor de prioridade que pode ser definido manualmente ou seguir o valor de PLD em cada parque. Quanto maior for a prioridade, menor será a limitação naquele parque.

	Prioridade 3	Prioridade 2	Prioridade 1	Total
	Parque 1	Parque 2	Parque 3	
<b>Geração atual (MW)</b>	50	30	10	90
<b>Geração esperada (MW)</b>	50	30	20	100
<b>Limitação (MW)</b>	50	30	10	90

Tabela 4. Geração e limitação de potência Cenário IV

O parque 1 tem a maior prioridade, 3 no caso, e recebe como limitação tudo o que ele é capaz de gerar. De modo que do limite imposto de 90 MW, 50 MW foram distribuídos para o parque 1. Sobrando 40 MW para ser distribuídos entre os parques 2 e 3. O parque 2 tem a segunda maior prioridade e recebe como limitação tudo o que ele é capaz de gerar, 30 MW. Desse modo restam apenas 10 MW a serem distribuídos para o parque 3, que tem a menor prioridade.

Neste cenário a geração final também fica exatamente no mesmo patamar de 90 MW de limite imposto.

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O Otimizador de limitação é uma ferramenta desenvolvida pela empresa Automalógica em plataforma Elipse e vem sendo aplicada em SCADA de Centros de operação de complexos eólicos.

Essa solução foi aplicada em um complexo eólico que possui 10 parques, cada parque com seu próprio PPC. Os parques têm a potência nominal exibida na Tabela 5.

Parque	Potência nominal (MW)
1	22,4
2	22,4
3	22,4
4	11,2
5	24,0
6	12,8
7	14,4
8	14,4
9	11,2
10	14,4

Tabela 5. Potência nominal por parque

O nome da empresa fornecedora dos dados será omitido por exigência da mesma. O período de análise se dá no mês de junho de 2023.

O gráfico de perda acumulada de energia por restrições de geração é apresentado na Figura 3. Cada degrau do gráfico representa uma contabilização de perda. Percebe-se que nesse mês ocorreram várias restrições de geração.

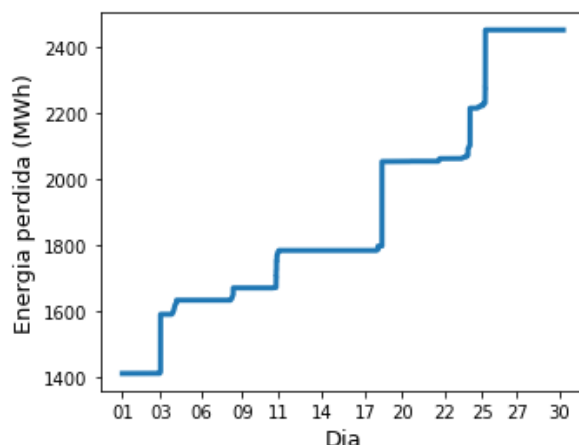


Figura 3. Perda total acumulada (MWh) em junho de 2023

A potência perdida acumulada saiu de um patamar de 1413 MWh no início do mês, para um patamar de 2451 MWh. Totalizando uma perda acumulada de 1038 MWh, demonstrando que a ferramenta foi ativamente utilizada durante esse mês.

Pela Figura 4 percebe-se que todos os 10 parques sofreram limitações ao longo de junho de 2023.

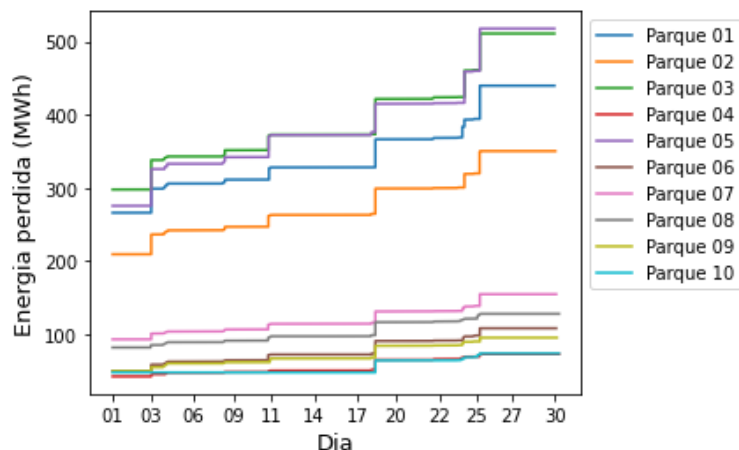


Figura 4. Perda acumulada (MWh) por parque em junho de 2023

Porém alguns parques sofreram mais perdas do que outros. Nesse caso otimizador foi configurado para operar no modo de distribuição equilibrada, onde o objetivo é deixar os parques controlados na potência mais próxima possível um do outro.

Comparando-se, por exemplo, as perdas do parque 4 com as perdas do parque 5, percebe-se que o parque de maior potência nominal sofreu maiores perdas.

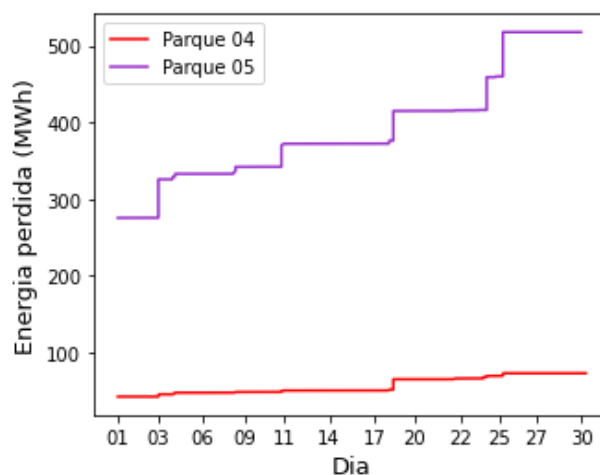


Figura 5. Perda acumulada (MWh) no parque 4 e parque 5 em junho de 2023

Nesse modo, o parque de menor potência nominal acaba sofrendo menos perdas porque gerou próximo de sua capacidade máxima para ficar com a geração o mais próxima possível dos parques de maior capacidade. O contrário ocorre com os parques de maior potência nominal. A Tabela 6 exibe a totalização das perdas do mês de junho em cada parque.



Parque	Energia perdida (MWh)
1	173,74
2	140,98
3	213,14
4	30,46
5	242,25
6	58,41
7	61,65
8	46,07
9	45,68
10	25,96

Tabela 6. Totalização de perdas (MWh) por parque em junho de 2023

A Figura 6 concentra a análise da totalização de perdas no dia 25/06/2023. Observa-se que houve perda acumulada considerável, saindo de 2230 MWh para 2450 MWh, totalizando 220 MWh de perdas de geração somente em 1 dia.

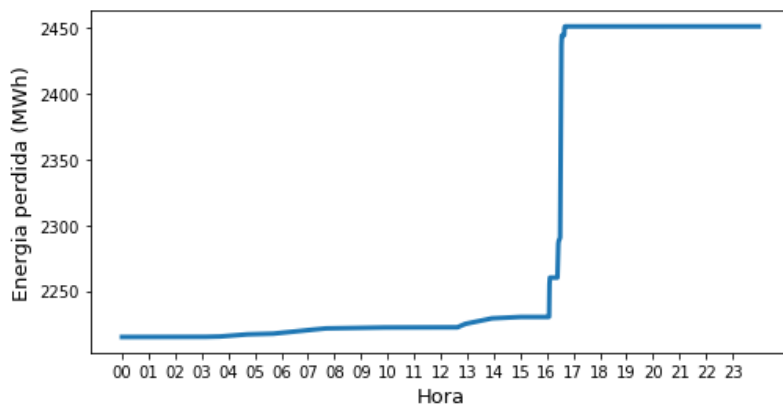


Figura 6. Perda total acumulada (MWh) em junho de 25/06/2023

Neste dia o limite imposto foi de 77 MW de potência e a limitação durou entre 9:00h até as 16:00h. Observando-se o comportamento da curva de potência nesse dia na Figura 7, percebe-se que o controle foi efetivo ao manter a geração total sempre próxima do limite imposto durante o período de restrição.

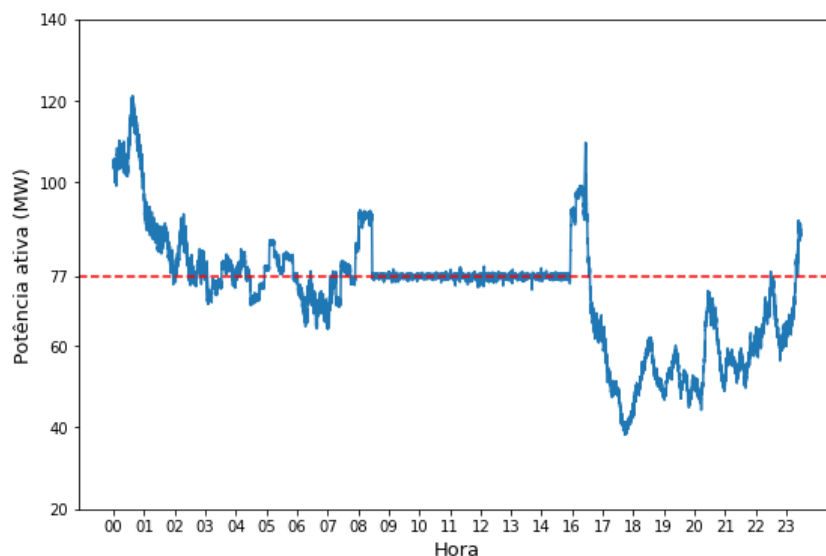


Figura 7. Potência ativa total em 25/06/2023

A título de demonstração, apresenta-se na Tabela 7 o histórico de *setpoints* do parque 10 no dia 25/06/2023 das 13:56 h até 15:56 h. Através da constante variação do *setpoint* de potência do parque 10, é possível observar que o algoritmo procura se adequar às oscilações de vento para otimizar a limitação a cada ciclo de cálculo, 10 minutos nesse caso.

<b>Data</b>	<b>Setpoint Parque 10 (MW)</b>
25/06/2023 15:56:36.864	7,76
25/06/2023 15:46:36.516	7,68
25/06/2023 15:36:36.640	8,05
25/06/2023 15:26:36.315	7,66
25/06/2023 15:16:36.472	7,65
25/06/2023 15:06:37.258	6,66
25/06/2023 14:56:35.371	8,06
25/06/2023 14:46:34.792	7,70
25/06/2023 14:36:34.577	7,78
25/06/2023 14:26:34.616	5,55
25/06/2023 14:16:35.017	4,92
25/06/2023 14:06:36.501	6,01
25/06/2023 13:56:34.009	6,44

Tabela 7. Histórico de *setpoints* do Parque 10 das 13:56h até 15:56h do dia 25/06/2023

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pelo exposto, é possível concluir que o otimizador de limitação funciona adequadamente, controlando a potência do complexo no limite desejado. Além de trazer alguns benefícios para a operação:

### Otimização e confiabilidade no controle de potência

O limite imposto é seguido à risca pelo otimizador, evitando maiores perdas com restrições abaixo do limite imposto e evitando penalidades por ultrapassagem desse mesmo limite.

### Agilidade

Pela comparação entre o método manual e o otimizado é possível concluir que é muito difícil um operador realizar a distribuição ótima manualmente e ainda adequar periodicamente a limitação em cada parque considerando as flutuações de capacidade de geração em função da constante variação de velocidade de vento. Com o otimizador o operador precisa apenas ligar o otimizador e inserir o *setpoint* requerido pelo ONS. Depois desse passo, o otimizador faz a limitação em cada parque e recalcula essa distribuição periodicamente para considerar as flutuações de velocidade de vento e potência esperada. Enquanto manualmente o operador teria que definir individualmente a potência em cada parque, um *setpoint* para cada PPC existente na planta a ser limitada. Além disso um único *setpoint* no otimizador, diminui as chances de erro humano em comparação com a necessidade de vários *setpoints* no caso do controle manual por parque.

### Diminuição da carga de trabalho da operação

Com o otimizador fazendo a limitação de geração automaticamente, o operador do COG fica livre para dar atenção a eventos mais críticos do dia a dia de um centro de controle de geração eólica.

## REFERÊNCIAS

- [1] Ekanayake, J.; Liyanage, K.; Jlanzhong Wu; Yokoyama, A.; Jenkins, N. "Smart grid - technology and applications." WILLEY, 2012.
- [2] Campos, B. P.; Ribeiro P. F.; Edival, L. S., "Integração de informações para o monitoramento de métricas de desempenho de uma microgrid" XII CBQE, 2017.
- [3] M. Steinbuch; W.W. de Boer; O.H. Bosgra; S.A.W.M. Peters J. Ploeg; " Optimal control of wind power plants" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988.
- [4] Submódulo ONS 3.6; "Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão", 2016
- [5] Campos, B. P.; Silva, M. R. "Demand Forecasting in Residential Distribution Feeders in the Context of Smart Grids." In: International Conference on Industry Applications, 2016.
- [6] Torquato, R.; Trindade, F. C. L.; Freitas, W. "Analysis of the harmonic distortion impact of photovoltaic generation in Brazilian residential networks." Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, p. 239–243, 2014.
- [7] <https://automalogica.com.br/otimizador-de-limitacao-de-potencia>