

# APLICAÇÃO DE CONTROLES DE GERAÇÃO EM GRANDES USINAS FOTOVOLTAICAS NO BRASIL

PPC – Power Plant Controller

CONTROL, EXCITATION AND  
AUTOMATION OF GENERATORS  
AND TURBINES



# RODRIGO PEREIRA GOSMANN

- Engenheiro de Controle e Automação Industrial – UFSC
- Especialista em Ciência de Dados e Big Data – PUC Minas

Trabalho na REIVAX desde 2008.

Engenheiro de novos produtos da linha renováveis. Atuando como líder técnico da equipe solar, coordenando e executando as atividades científicas nos projetos em que participa.

Possui experiência em controle/modelagem/simulação de unidades geradoras, usinas hidroelétricas e reguladores de velocidade/tensão de turbinas/geradores. Aperfeiçoou reguladores de turbinas de hidroelétricas.

Criou reguladores para turbina termoelétricas do tipo vapor, usinas fotovoltaicas e para turbinas eólicas, permitindo o domínio tecnológico destes geradores pela empresa e o entendimento de novos mercados.



## SUMÁRIO

COORDENAÇÃO DA GERAÇÃO ELÉTRICA

MODELAGEM DA USINA

RESULTADOS DE CAMPO

# SOMOS UMA EMPRESA QUE REVOLUCIONA



A REIVAX é líder no fornecimento de soluções para o controle e supervisão da geração de energia.

Somos uma **empresa global** fundada em 1987.

Possuímos aplicações com tecnologia própria ou de mercado.

**+ de 2000**  
equipamentos  
instalados

**+ de 170GW**  
equivalente em  
equipamentos

**+ 45 países**  
atendidos pela  
REIVAX





# COORDENAÇÃO NACIONAL DA GERAÇÃO ELÉTRICA

# COORDENAÇÃO DA GERAÇÃO x CARGA – ONS

- § A energia elétrica pode ser facilmente gerada, transmitida e transformada. Porém, até agora não foi possível armazená-la de forma prática, fácil e barata.
- § O operador independente do sistema (ISO) coordena o equilíbrio entre geração e consumo elétrico em uma dada região.
- § No Brasil isso é desempenhado pelo ONS.
- § Objetivo do ONS:
  - § Priorizar a entrega de energia para os consumidores, visando menor custo
  - § Robustez de fornecimento frente a distúrbios na rede elétrica ou escassez de recursos.  
Ex: seca, enchentes, incêndio, curto-circuito.



# META DE GERAÇÃO - USINAS

- § Local de geração-transporte
  - § Grandes usinas geradoras acessam a rede de transmissão por intermédio de subestação elevadoras
- § Quem define a meta de geração:
  - § ONS define metas de produção para as subestações elevadoras
- § Local de transporte-consumo:
  - § Uma vez que a energia alcançou a rede de transmissão então grandes consumidores se conectam usando subestações abaixadoras



Sistema de transmissão brasileiro



## REGULAÇÃO PRIMÁRIA (Gerador)

Controlador de um único gerador, sendo ele 1 inversor ou 1 aerogerador. PPC não atua nessa camada



## REGULAÇÃO SECUNDÁRIA (Usina)

Controlador de geradores e atua se comunicando com os reguladores primários. Pode-se dizer que controla uma usina de geradores. PPC atua nessa camada



## REGULAÇÃO TERCIÁRIA (Usinas)

Controlador de reguladores secundários. Controla várias usinas ao mesmo tempo. PPC também pode atuar nessa camada.



# META DE GERAÇÃO – ONS X AGENTE DE GERAÇÃO



## SCADA ONS

- Exibição de indicadores nacionais
- Exibição de metas de geração das usinas



## SCADA da usina

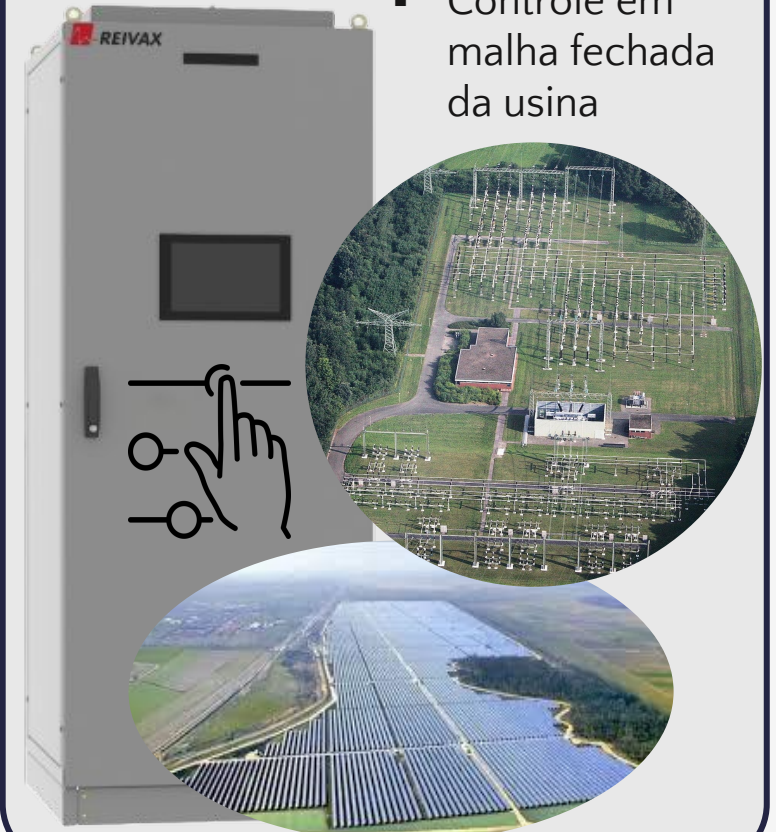
- Exibição de indicadores da usina
- Envio de metas para controladores



## AGENTE DE GERAÇÃO

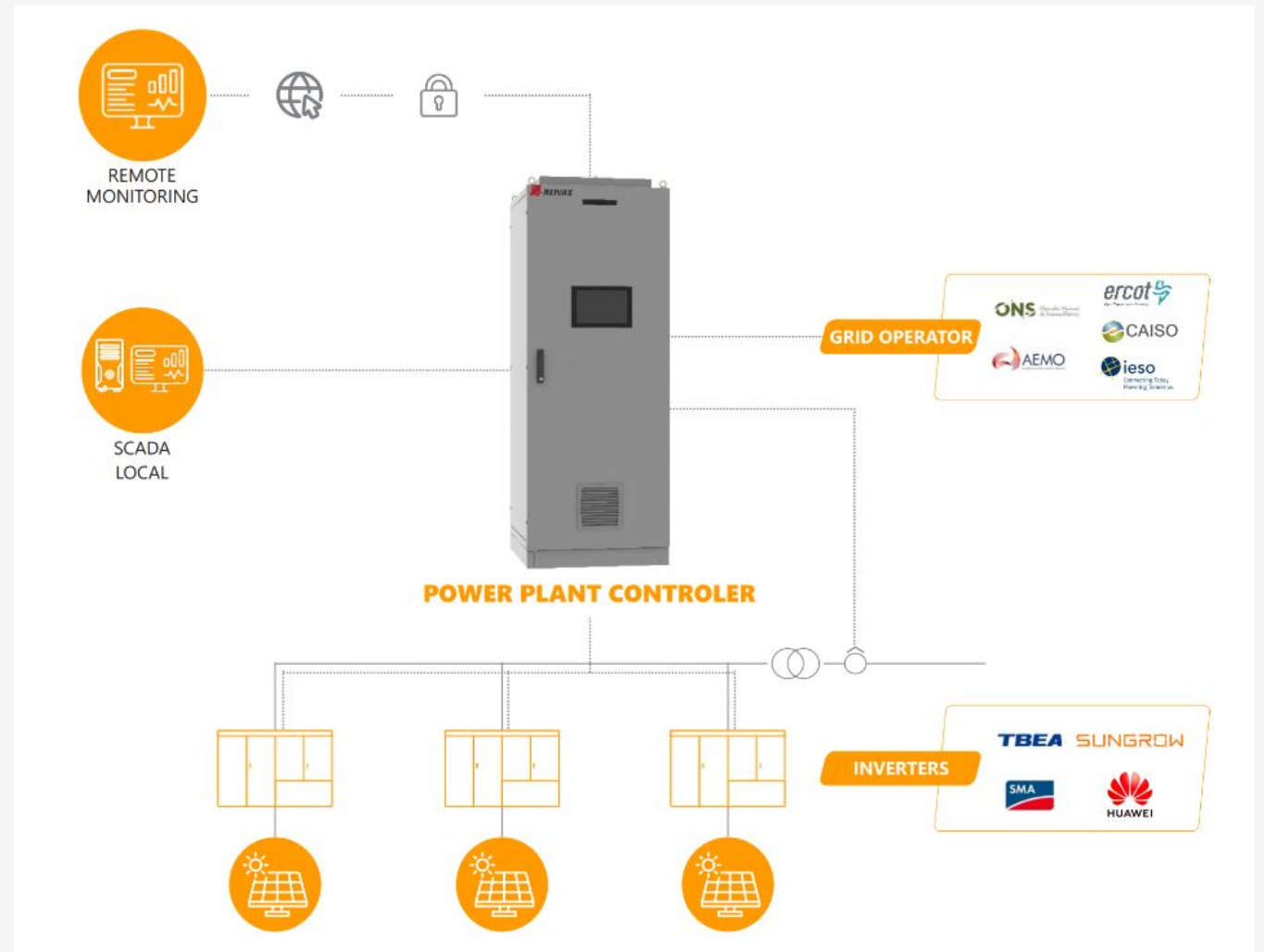


- Controle em malha fechada da usina



# PPC REIVAX

- § Em usinas fotovoltaicas, o PPC coordena os inversores e outros PPCs, organizando o funcionamento conjunto dos equipamentos.
- § Dessa forma, é possível alcançar os objetivos da usina em relação ao ponto de conexão com o sistema elétrico:
  - § Metas de geração de potência ativa
  - § Metas de tensão/Fator de potência/potência reativa





# MODELAGEM DA USINA

# MODELAGEM DA USINA

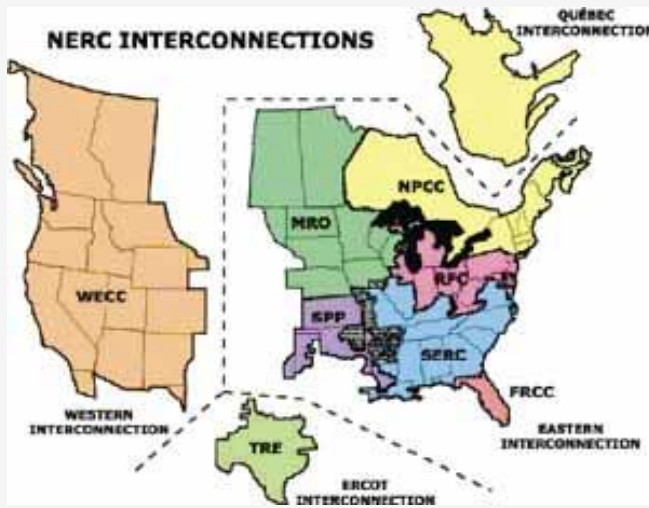
- § Tanto antes quanto após o início da operação é necessária a representação matemática do comportamento dinâmico da usina:
  - § Controlador
  - § Planta
- § O operador nacional do sistema realiza uma simulação do modelo amplo, contendo a representação individual das usinas.

## MODELO PROPRIETÁRIO x TEMPLATES

- § Proprietário –
  - § Fabricantes tem a tendência de usar modelo proprietário devido a melhor representatividade dos fenômenos.
  - § Modelos privados, tal como os modelos da REIVAX 😞
- § Templates –
  - § Permitem um padrão de mercado
  - § São públicos
  - § Podem perder em representatividade dinâmica
  - § Podem ser mais complexos que o necessário

# MODELAGEM WEC

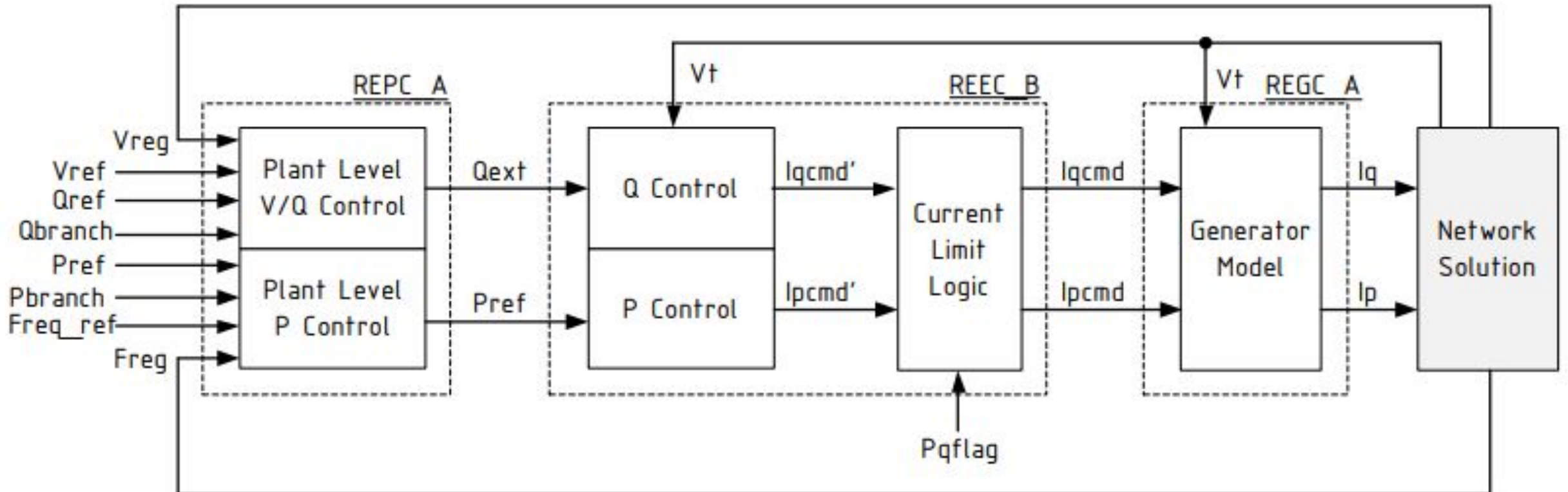
- Entidade sem fins lucrativos, responsável por estados da costa oeste americana
- Realiza estudos visando avaliar a confiabilidade da rede elétrica
- Publica modelos de simulação que são largamente aceitos na comunidade internacional
- Modelo de interesse:
  - Central Station PV System Model – 10MW>



Exemplo de usina de 10MW – 400m x 400m

# CENTRAL STATION PV SYSTEM MODEL

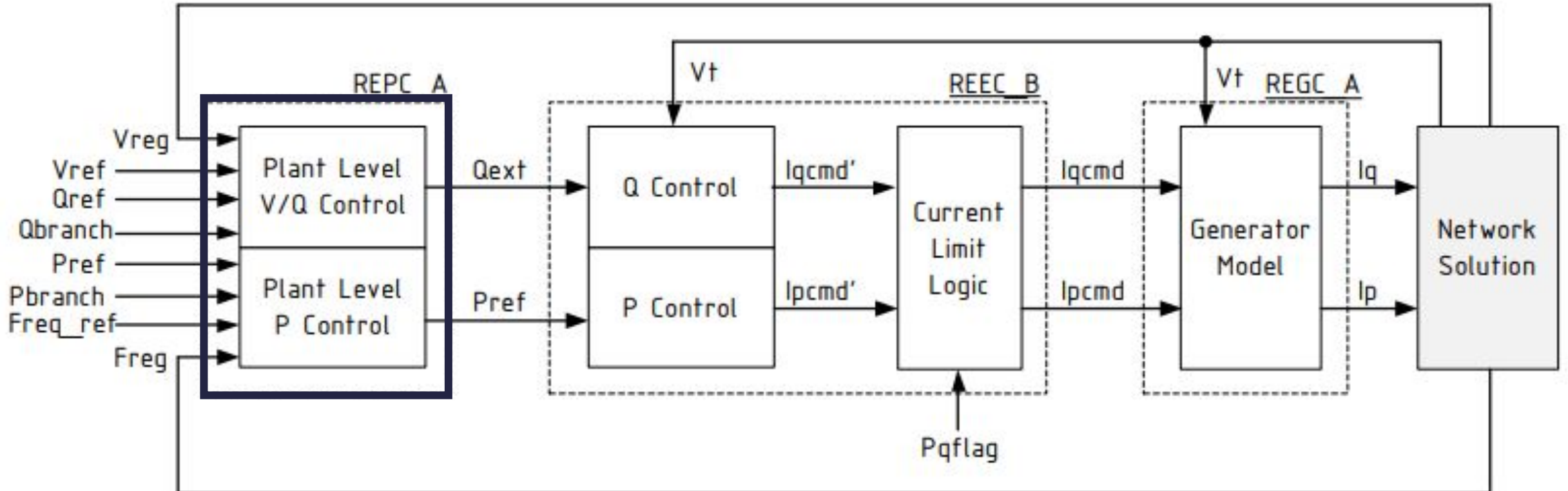
- Composto pelo seguintes módulos:
  - REPC\_A – Controlador da usina
  - REEC\_B – Controlador de potência do inversor
  - REGC\_A – Controlador de corrente do inversor



# MODELAGEM PPC

Função principal:

Emular o comportamento do controlador de potência ativa e reativa implementados na usina;



# MODELAGEM PPC – CONTROLE DE REATIVO

## Função principal:

Emular o comportamento do controlador de potência reativa implementados **na usina**;

## Chaves Seletoras:

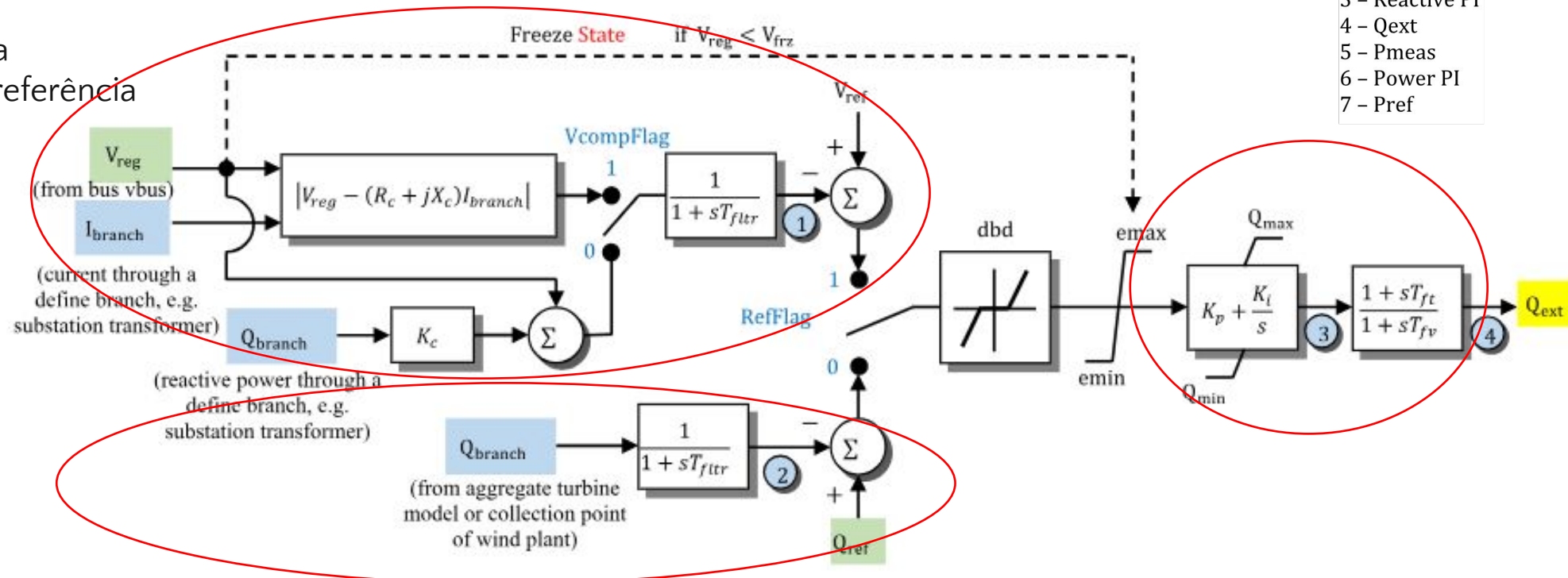
VcompFlag – 0 – estatismo, 1- compensação de queda de linha;

RefFlag – 0 – Potência reativa, 1 – Tensão

## Referência:

Vreg => Tensão de referência

Qref => Potência reativa de referência





# MODELAGEM PPC – CONTROLE DE ATIVO

## Função principal:

Emular o comportamento do controlador de potência ativa implementados na usina;

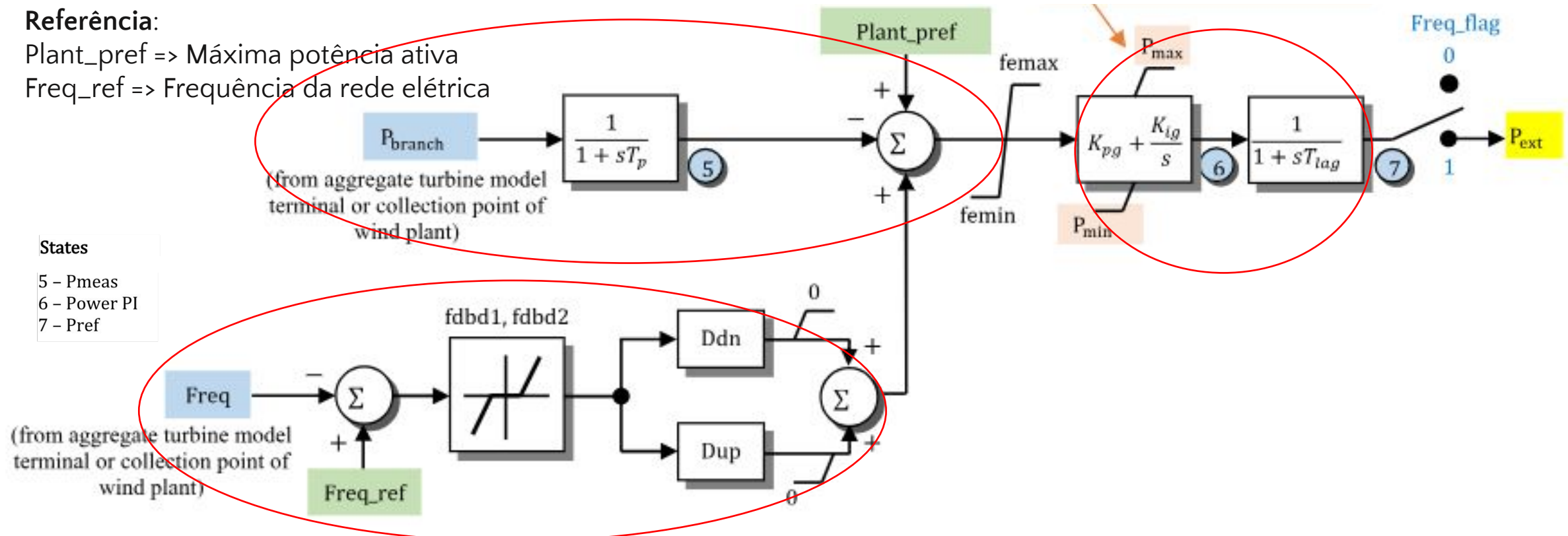
## Chaves Seletoras:

FreqFlag – 0 – Malha aberta, 1- Malha Fechada

## Referência:

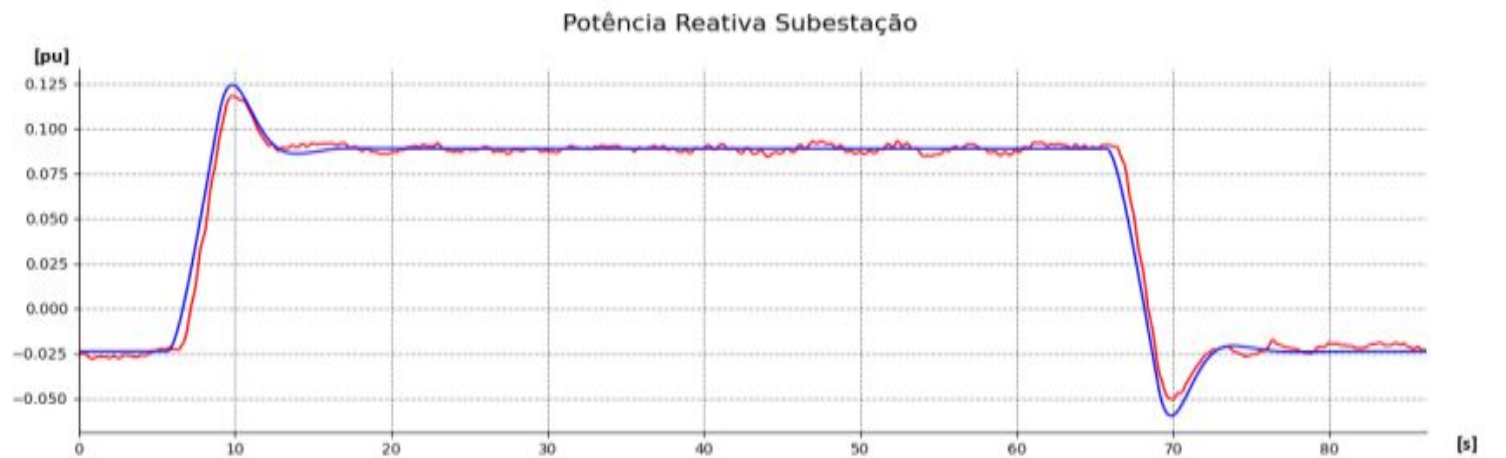
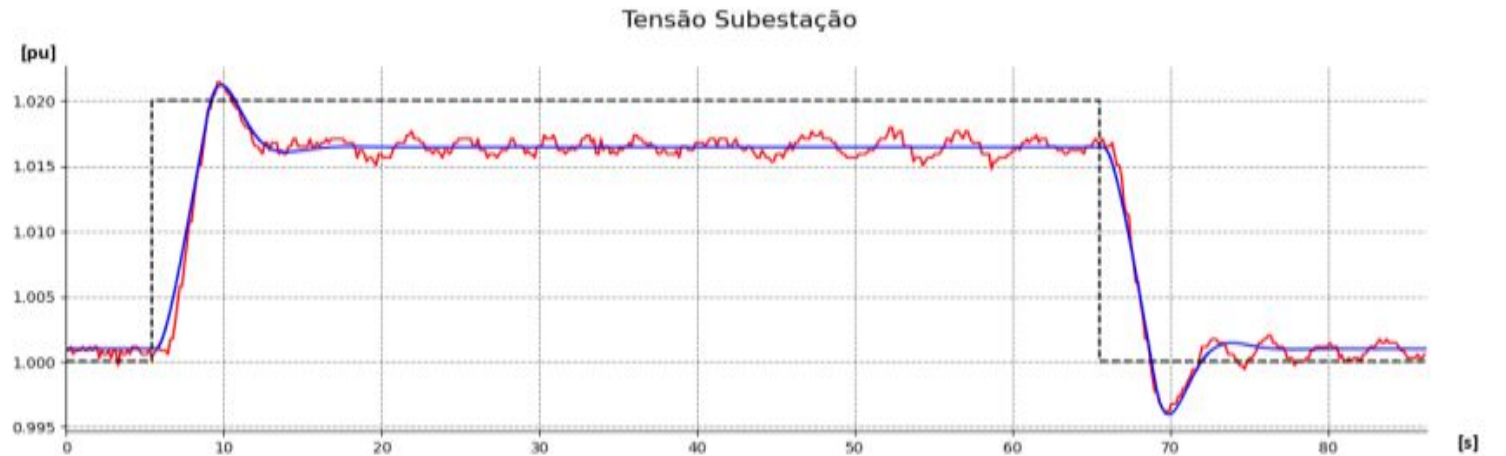
Plant\_pref => Máxima potência ativa

Freq\_ref => Frequência da rede elétrica



# MODELAGEM PPC – VALIDAÇÃO EM CAMPO

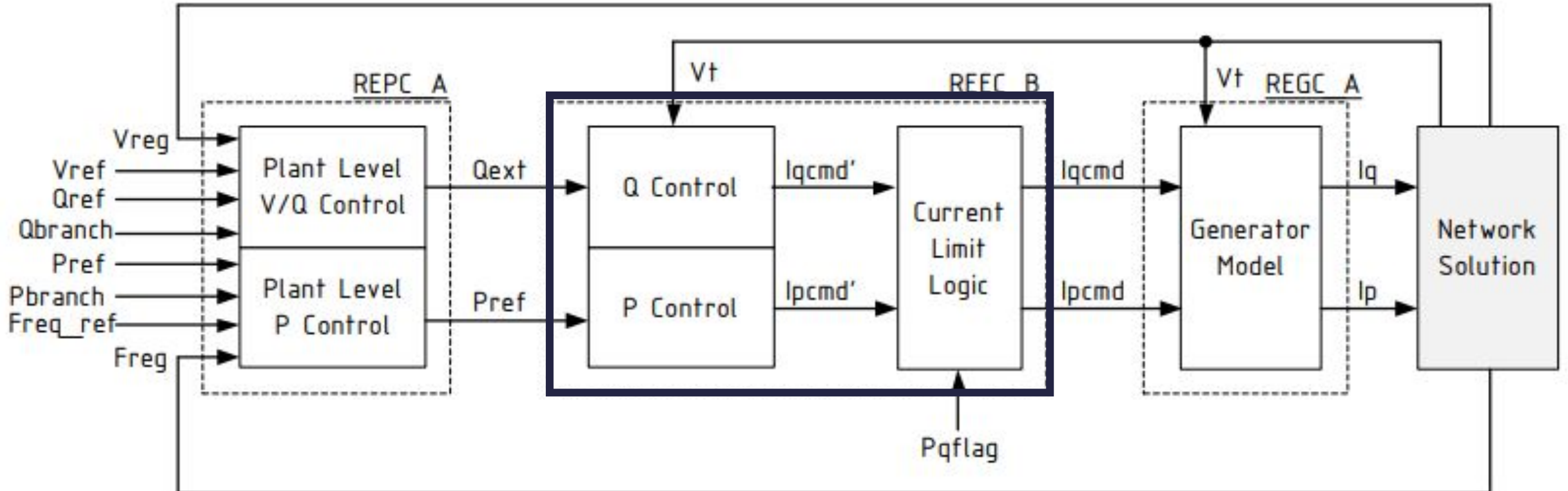
- Usina de 100MW.
- Em termos comparativos uma usina de 900MW conseguiria atender a necessidade energética de Florianópolis inteira.
- Observa-se boa aderência entre os dados de campo e o modelo dinâmico.



# MODELAGEM LENTA DO INVERSOR

Função principal:

Emular o comportamento do controlador de **potência ativa e reativa** implementados no inversor;



# MODELAGEM LENTA DO INVERSOR

## Função principal:

Emular o comportamento do controlador de potência ativa e reativa implementados **no inversor**;

## Observação:

Malha mestre Q, malha escrava V

## Chaves Seletoras:

PfFlag - 0 - potência reativa, 1- fator de potência;

Vflag - 0 - local Q, 1 - Controle de tensão

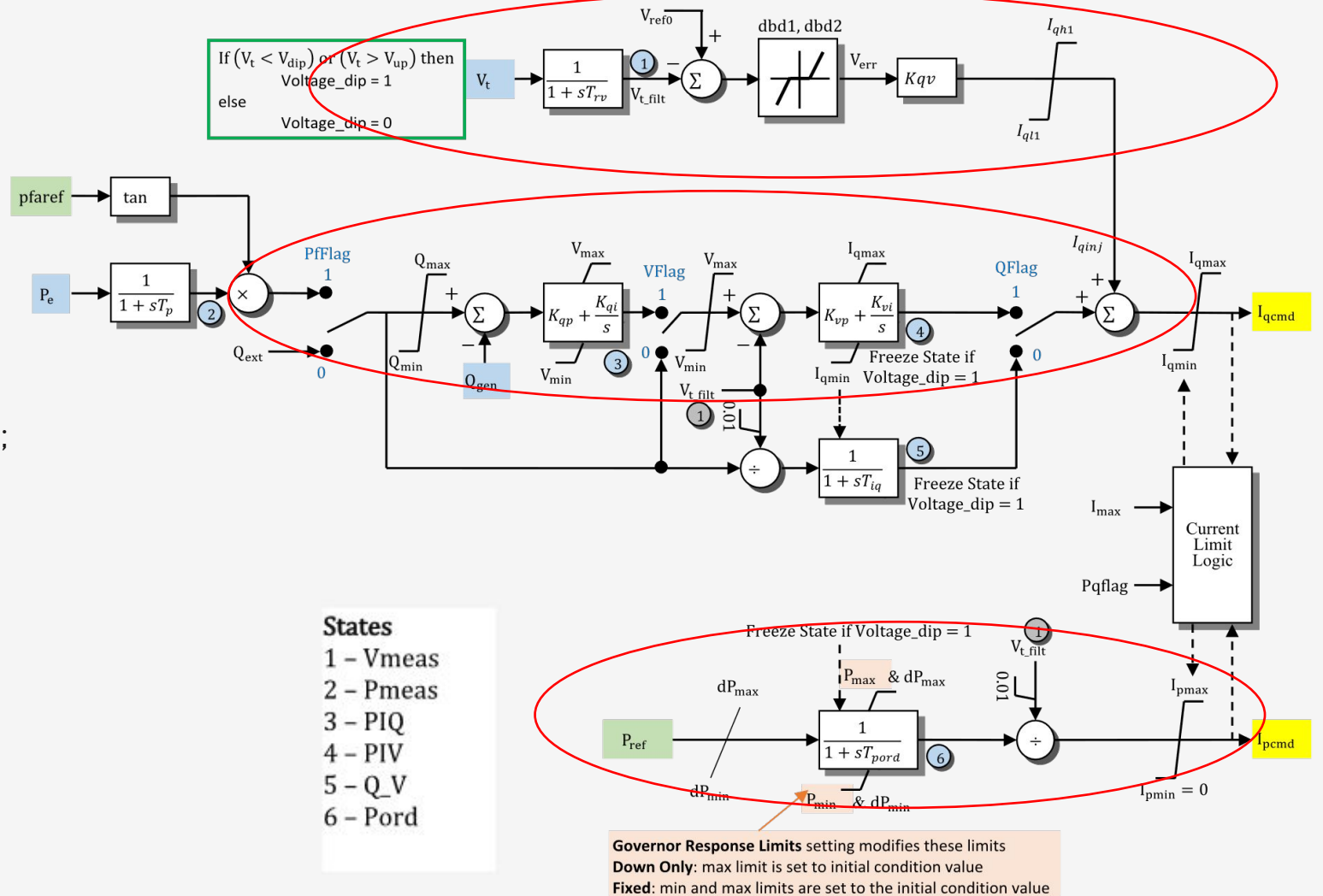
Qflag - 0 - Malha aberta, 1- Malha fechada

## Referência:

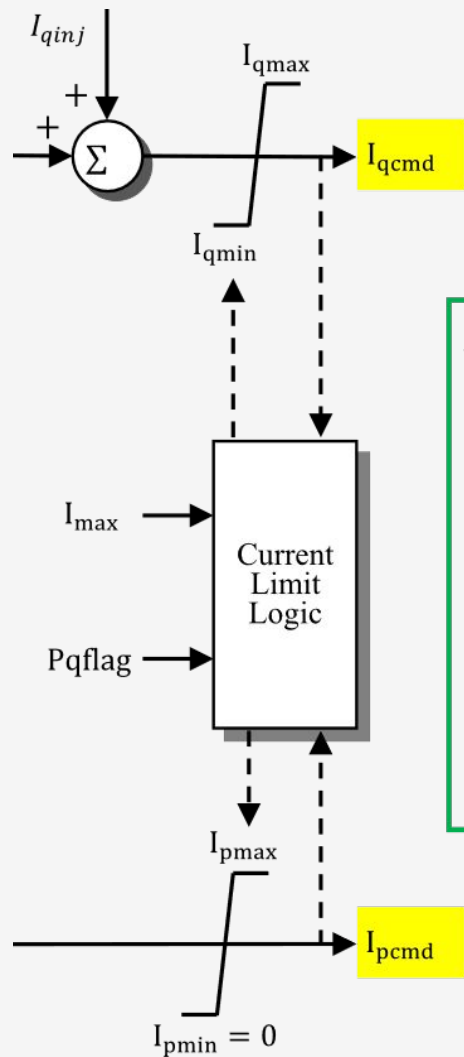
pfareg => Referência de fator de potência

Qext => Referência de potência reativa

Pref => Potência reativa de referência



# MODELAGEM LENTA DO INVERSOR



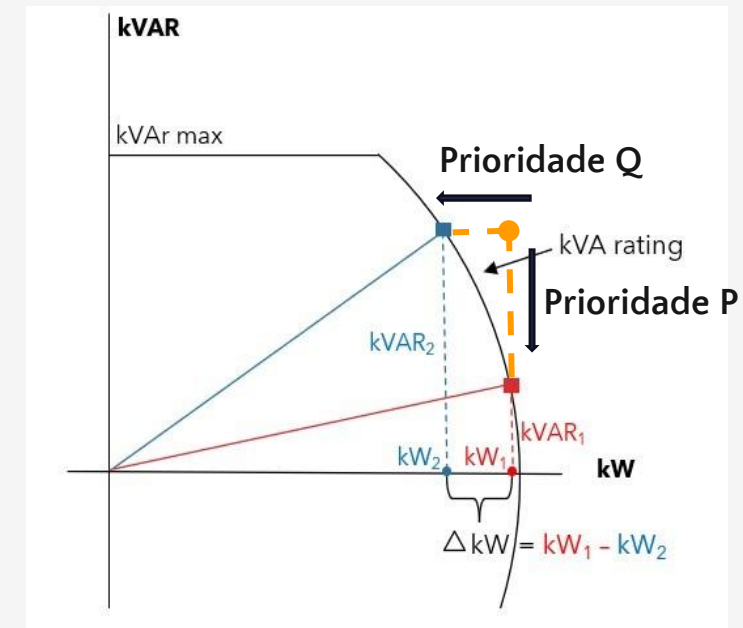
**Current Limit Logic**

Q Priority (Pqflag = 0)  
 $I_{qmax} = I_{max}$   
 $I_{qmin} = -I_{qmax}, I_{pmin} = 0$   
 $I_{pmax} = (I_{max}^2 - I_{qcmd}^2)^{1/2}$

P Priority (Pqflag = 1)  
 $I_{pmax} = I_{max}$   
 $I_{qmin} = -I_{qmax}, I_{pmin} = 0$   
 $I_{qmax} = (I_{max}^2 - I_{pcmd}^2)^{1/2}$

## Limite do inversor:

- $I_{qcmd}$  e  $I_{pcmd}$  não podem ter valores simultaneamente elevados, caso contrário o limite de corrente aparente máxima é excedido, causando danos ao equipamento.
- Qual limitar em caso de se alcançar o limite?



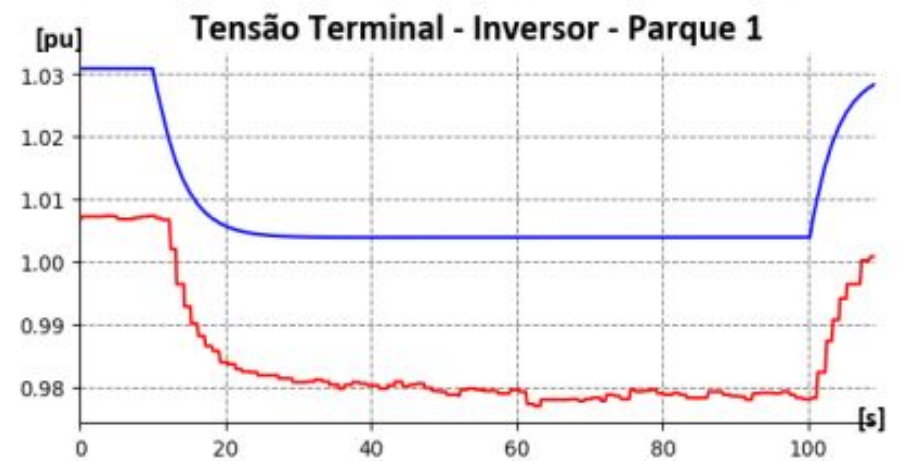
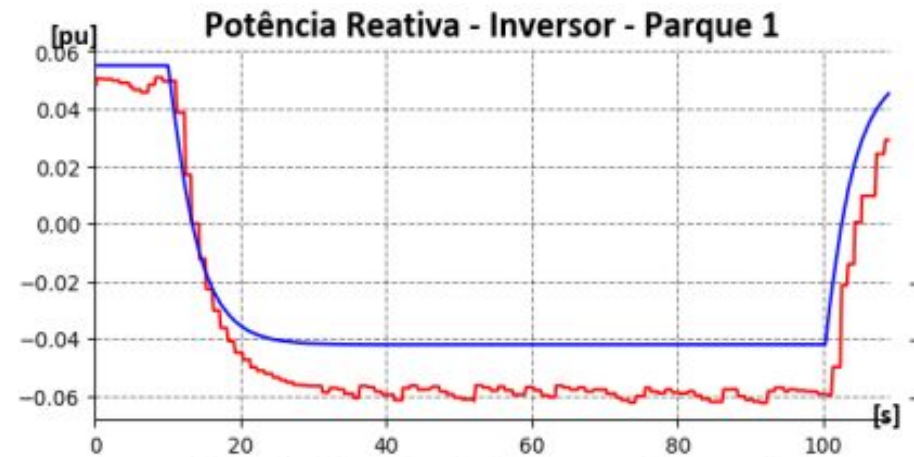
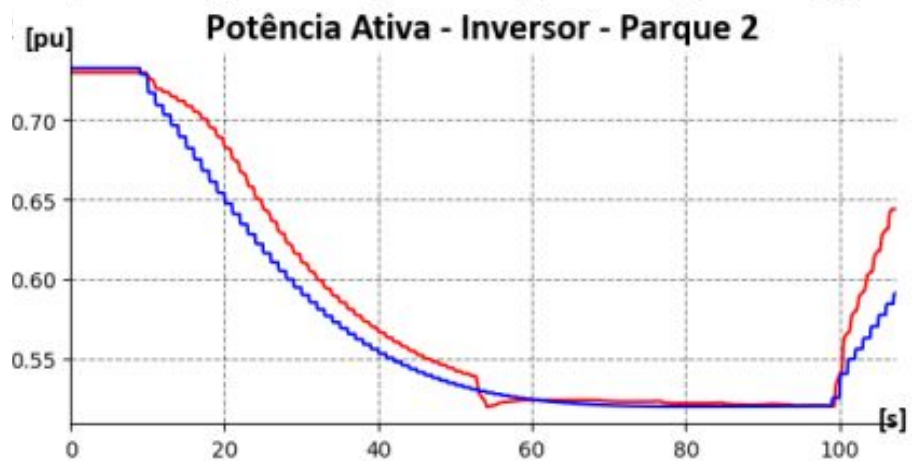
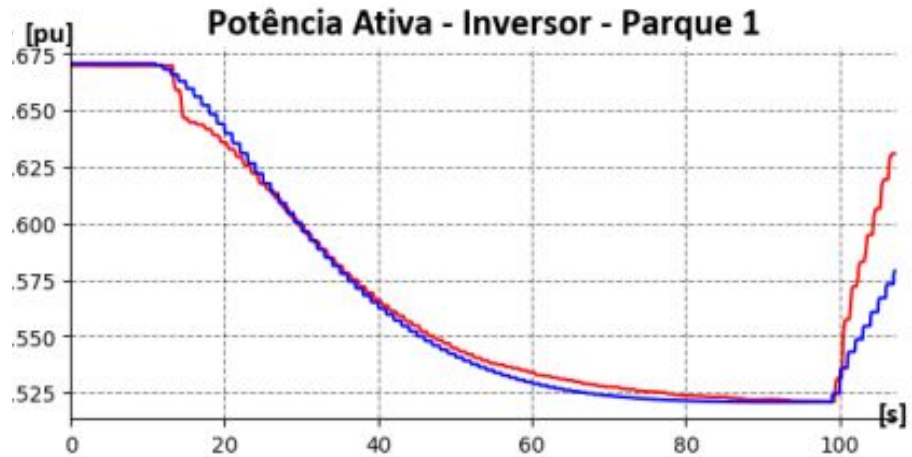
## Q priority x P priority:

Q priority => Prioriza o  $I_{qcmd}$ . Importante para priorizar a injeção de reativo na rede elétrica, evitando apagões

P priority => Prioriza o  $I_{pcmd}$ . Diretamente relacionado com a principal fonte de remuneração da usina, que é geração de potência ativa.

# MODELAGEM LENTA DO INVERSOR – VALIDAÇÃO EM CAMPO

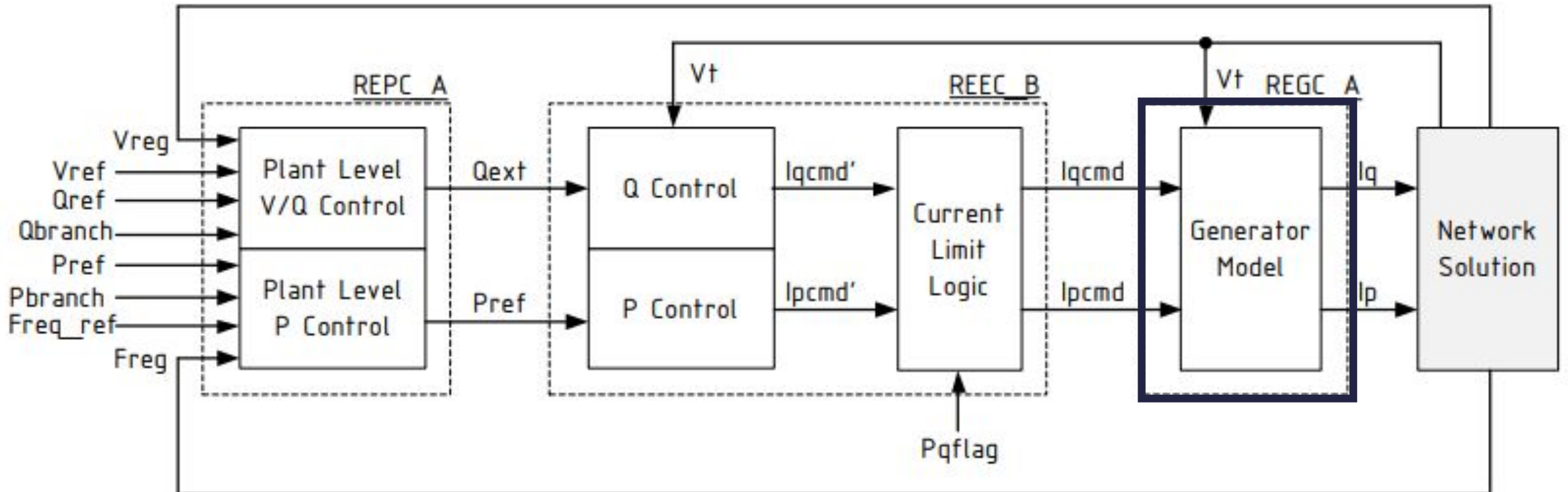
Potência da usina de 67MW.



# MODELAGEM RÁPIDA DO INVERSOR

Função principal:

- Emular o comportamento dos controladores de **corrente** implementados no inversor;



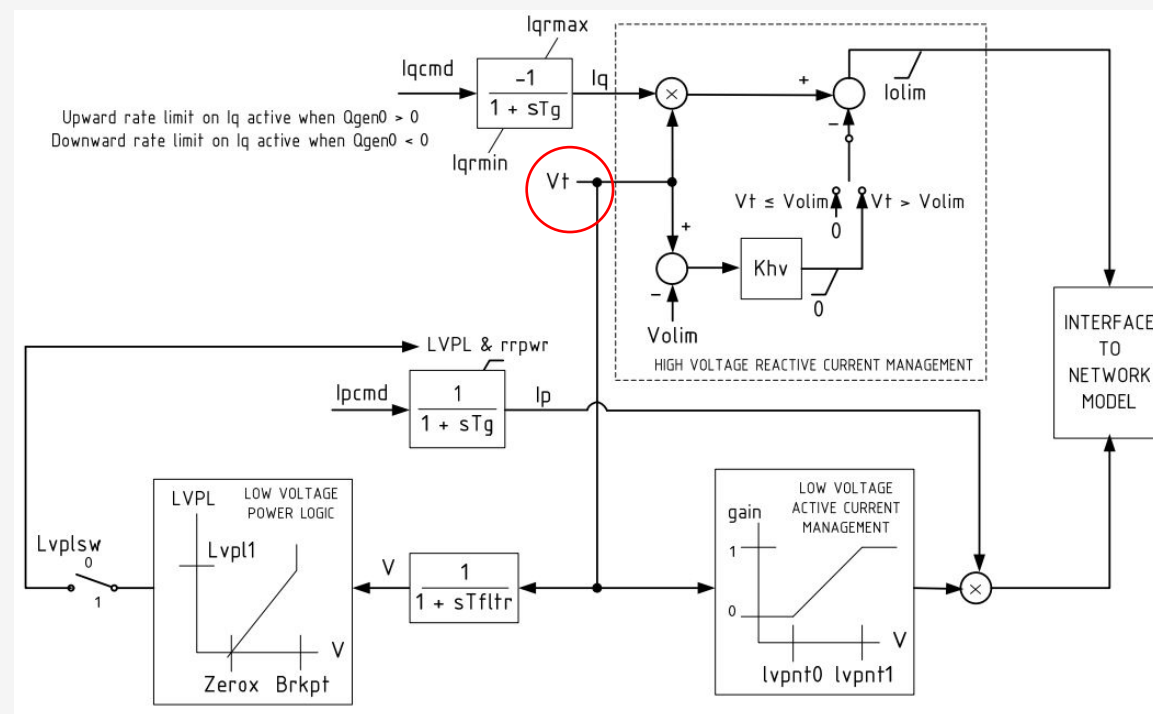
# MODELAGEM RÁPIDA DO INVERSOR

## Função principal:

- Emular o comportamento dos controladores de **corrente** implementados no inversor;
- Representar a redução de corrente ativa nas reduções de tensão, advinda da resposta da PLL;
- Representar o aumento/redução de corrente reativa para tensões extremas;

## Chaves Seletoras:

LPVLSW – 0 – lógica de baixa tensão desativada, 1- lógica de baixa tensão ativada;





# MODELAGEM RÁPIDA DO INVERSOR – VALIDAÇÃO EM CAMPO

- Grandes dificuldades práticas para se fazer em campo.
- 1. Referência é proveniente de outra malha de controle, não sendo acessível ao usuário final.
- 2. Distúrbios são de difícil aplicação em campo:
  - Baixa tensão: Pode ser forçada aplicando-se um curto-circuito na usina. Em tese a usina consegue sobreviver ao distúrbio, mas ninguém deseja arriscar a usina só para validação de modelo
  - Alta tensão: Como elevar a tensão até o suficiente para o teste? A tensão desejada é muito distante da nominal
- Alternativa é a realização em laboratório, em condições controladas.



RESULTADO  
DE CAMPO



# UFV ALEX – 270 MW

Cliente Final

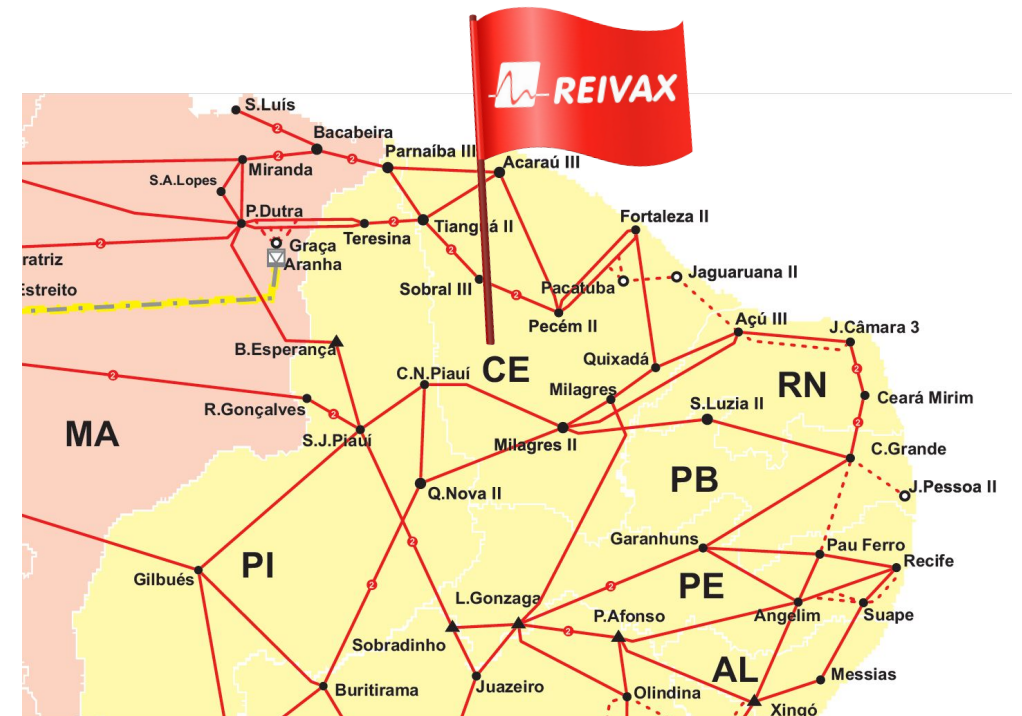
ELERA – Brookfield Renováveis

# UFV ALEX

## DADOS TÉCNICOS

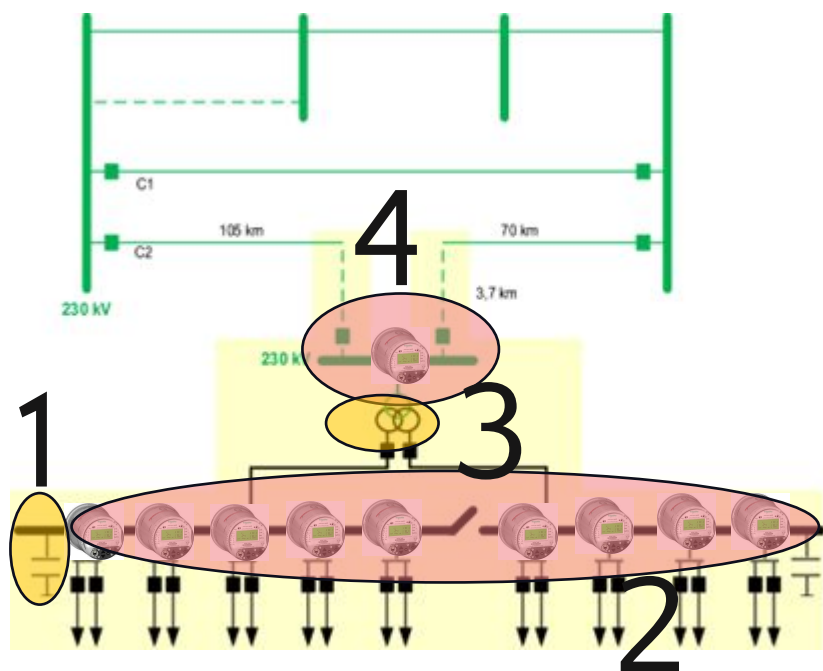


- Localidade: Limoeiro do Norte/CE
- Módulos fotovoltaicos: 900.000
- Potência total Instalada: 375 MWp
- Inversores: 81 Sungrow
- Potência Contratada (MUST): 270 MW (9 x 30MW)



# COMISSIONAMENTO

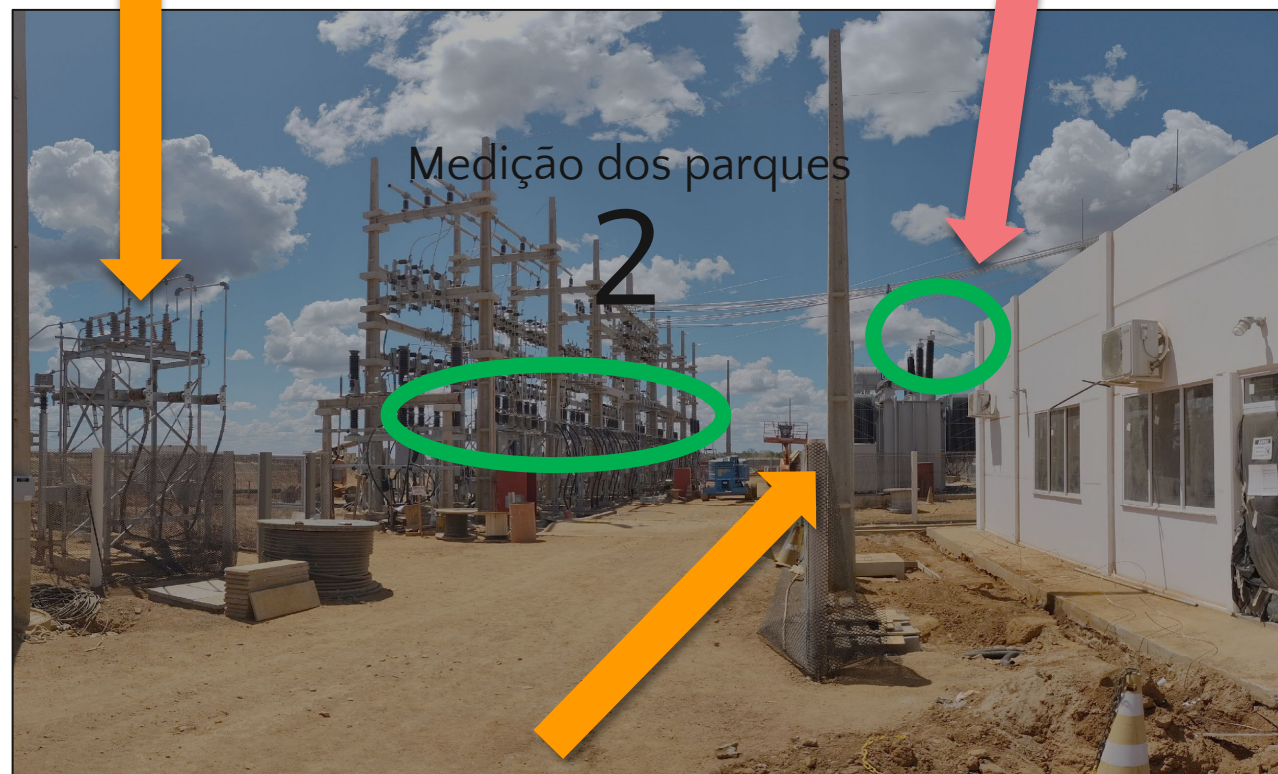
## RESUMO



- Controle
- Medição

1 Banco de capacitor

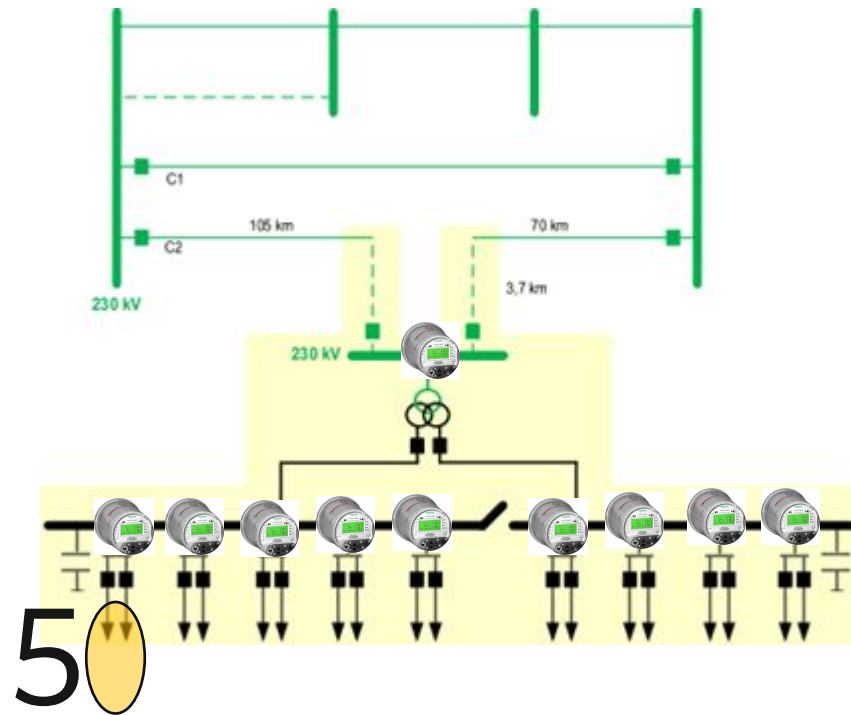
4 Medição de alta



3 Comutador de tap - OLTC

# COMISSIONAMENTO

## RESUMO

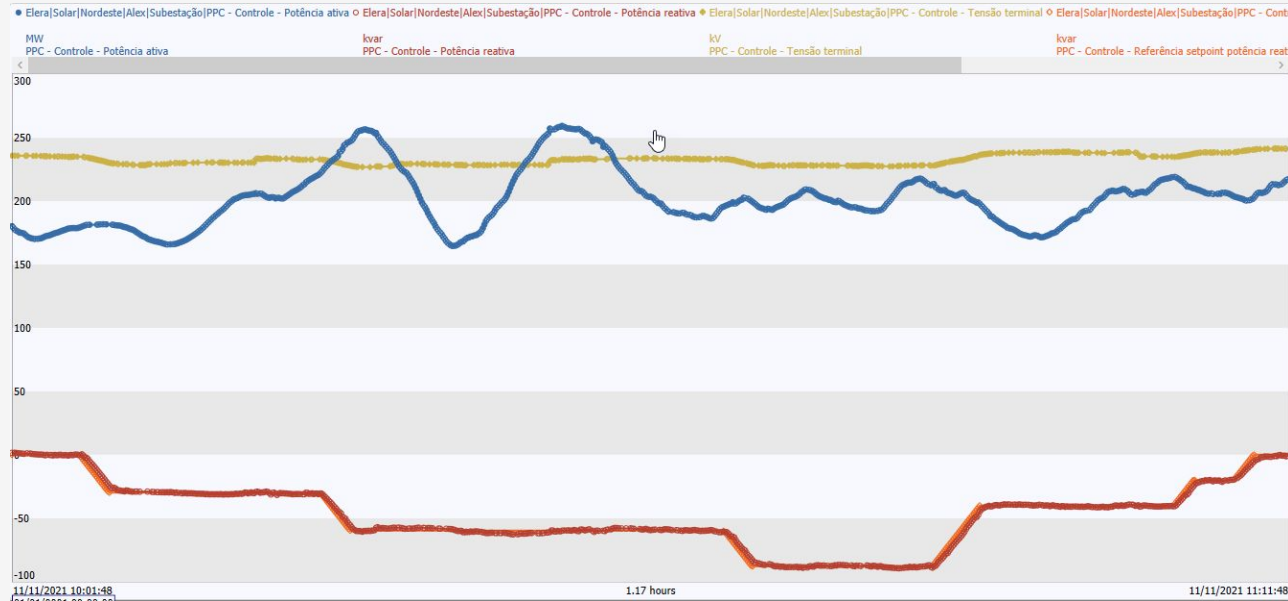


- Controle
- Medição

5 Inversor



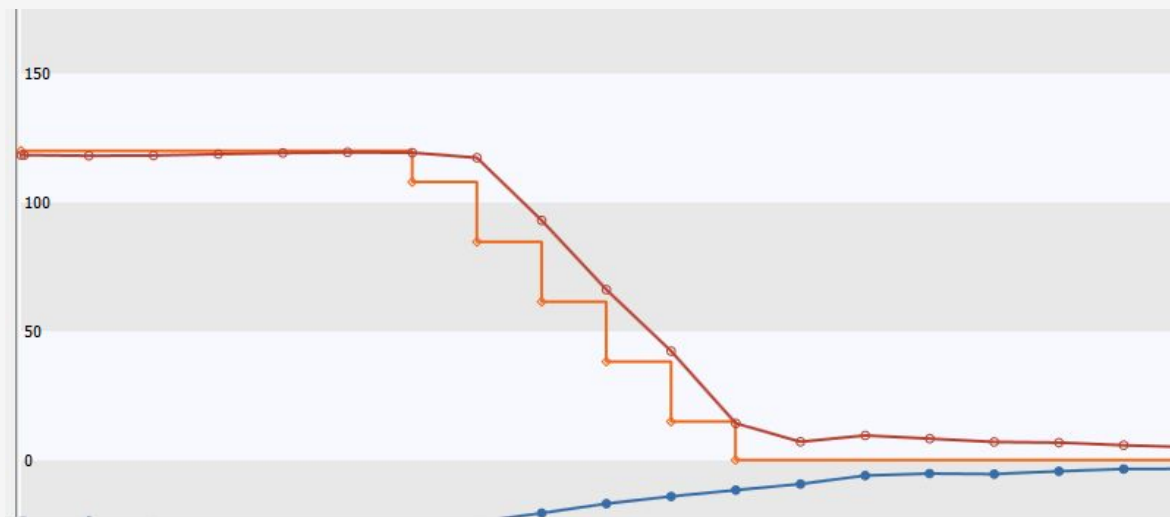
# ENSAIOS POTÊNCIA REATIVA



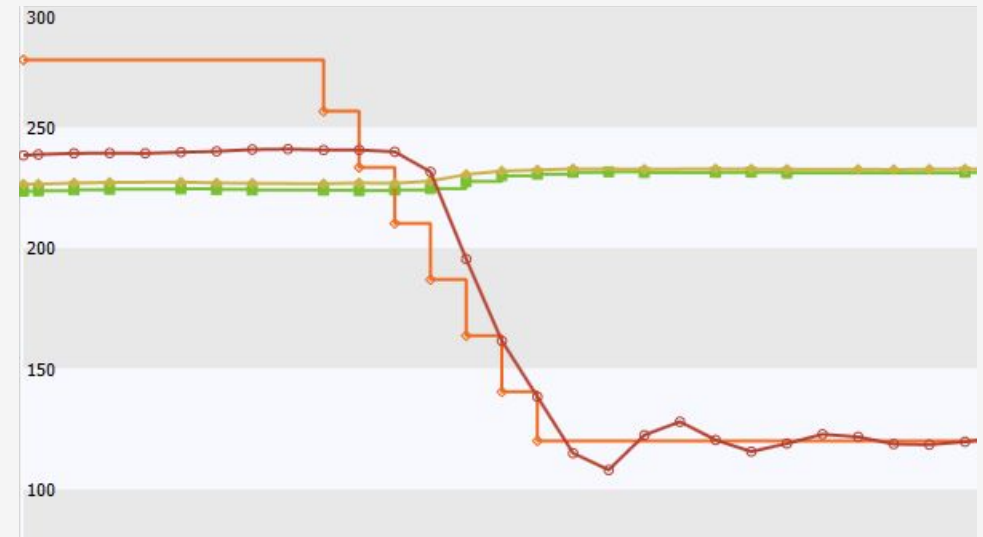
## Potência reativa seguindo o setpoint do PPC

- Linha vermelha perseguindo a laranja. Isso é o esperado para a malha de controle, sendo uma evidência do correto funcionamento

# ENSAIOS POTÊNCIA ATIVA



Limitação severa de potência

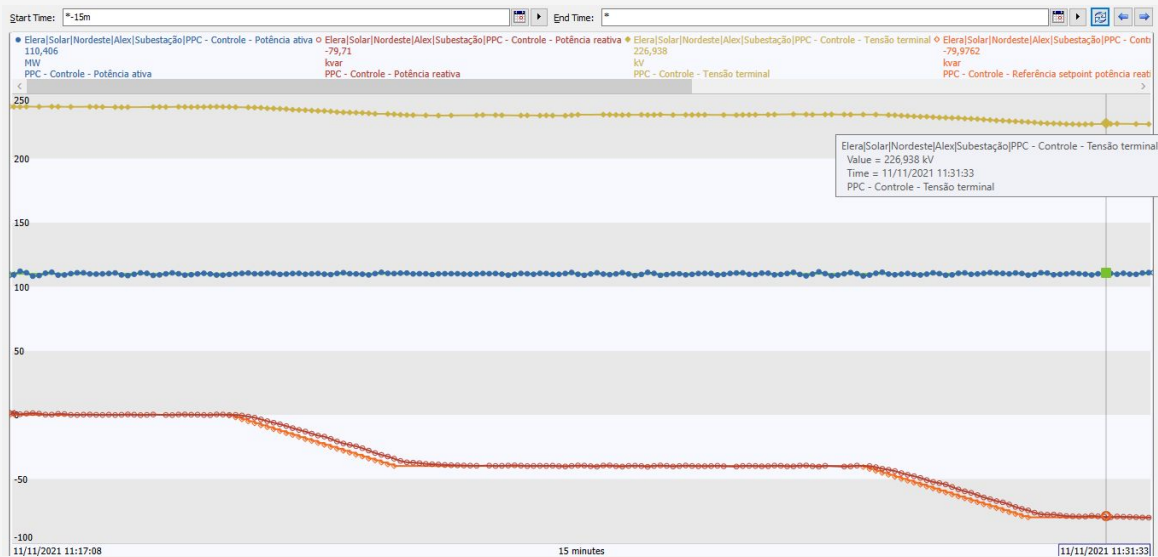


Limitação moderada de potência

- Importante para limitações severas de potência ativa

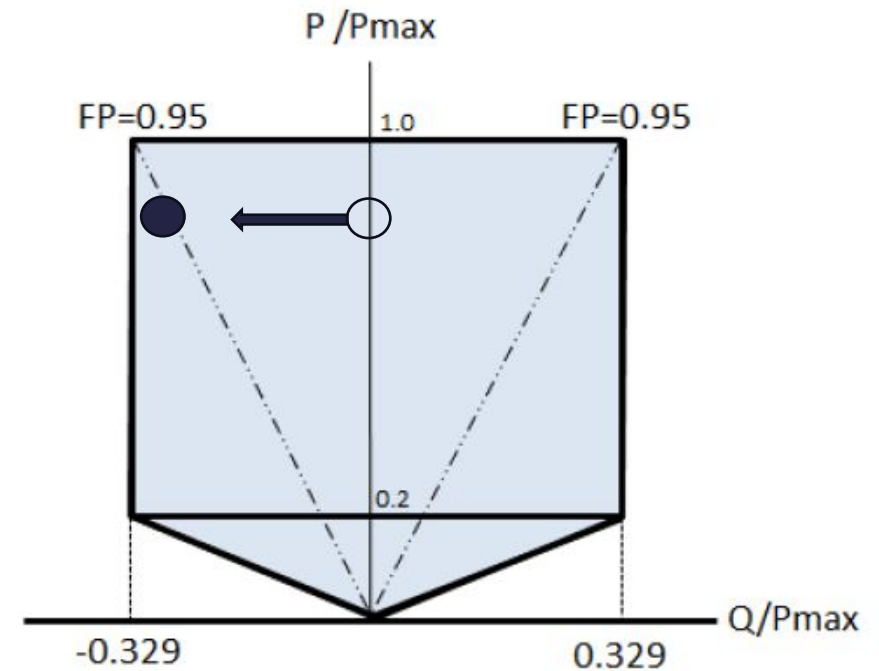


# ENSAIOS LIMITE MÍNIMO DE REATIVO

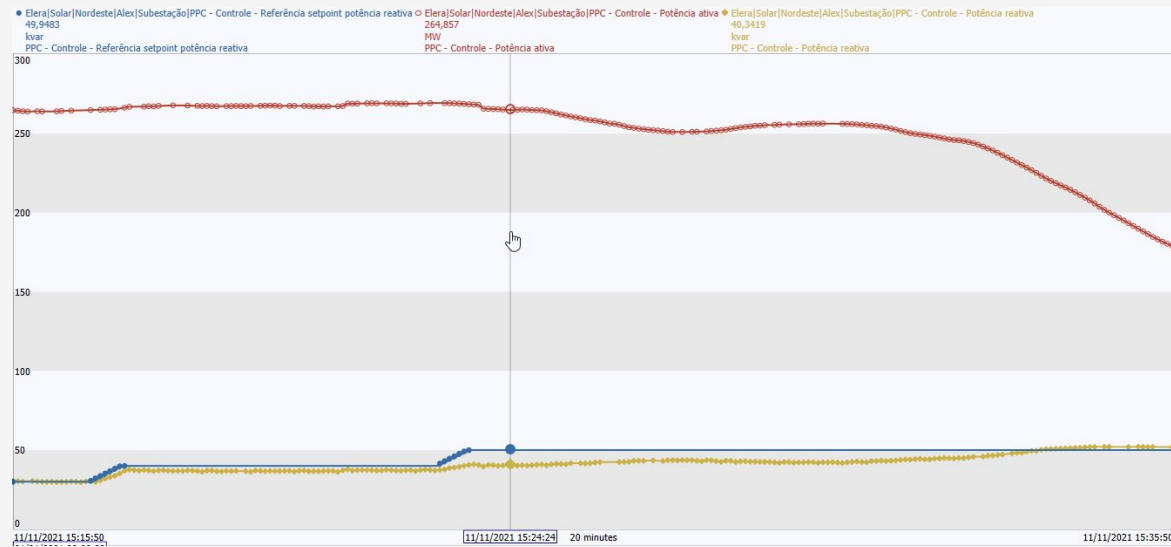


## Mín. de potência reativa – Sem limitação de inversores

- Ensaio com amplitude de mesma magnitude, mas com sinal trocado.
- Sem saturação de inversores

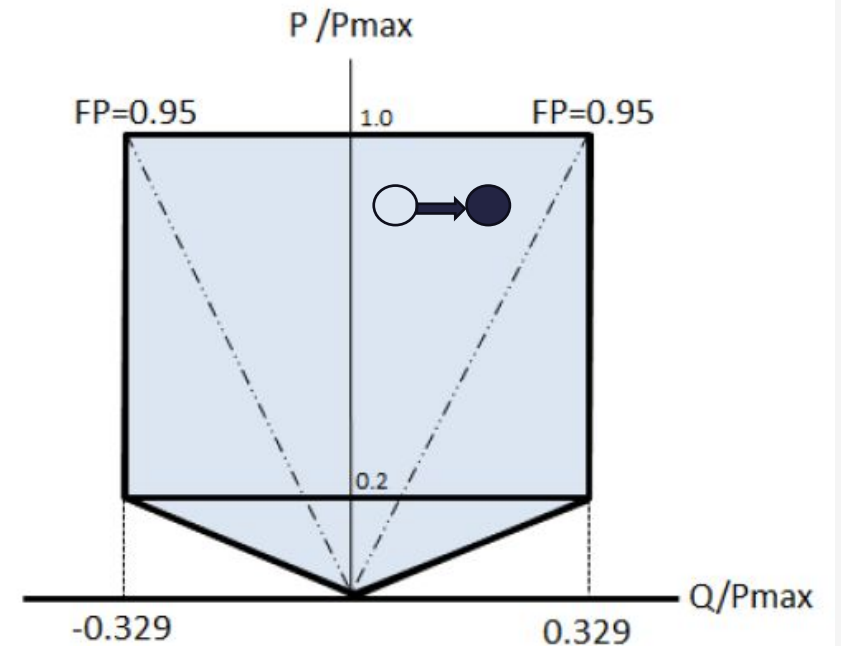


# ENSAIOS LIMITE MÁXIMO DE REATIVO



## Max. potência reativa - Limite aparente de alguns inversores

- Ensaio com amplitude de mesma magnitude, mas com sinal trocado.
- Para valores mais elevados de potência reativa alguns inversores começam a saturar
- Saturação de inversores: Os não saturados continuam a responder, mas a composição destes faz com que o ganho do processo seja menor, consequentemente mais lento
- Razão: Carga indutiva local significativa, atua absorvendo potência reativa, ajudando no limite mínimo



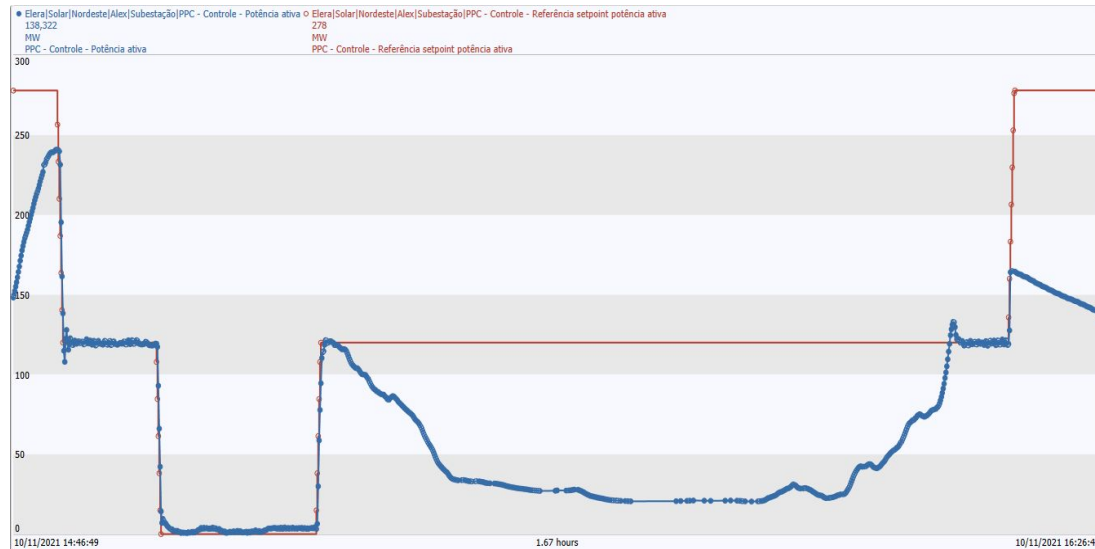
# EM FUNCIONAMENTO COMERCIAL PROTEÇÃO CONTRA AUMENTO DE IRRADIAÇÃO



Aumento abrupto da irradiação foi controlado pelo PPC, para evitar ultrapassagem do MUST

- Linha vermelha ultrapassa a meta somente temporariamente(overshoot)

# EM FUNCIONAMENTO COMERCIAL RESTRIÇÃO DE LIMITE DE GERAÇÃO



Limitação de potência ativa

- Linha azul abaixo da vermelha

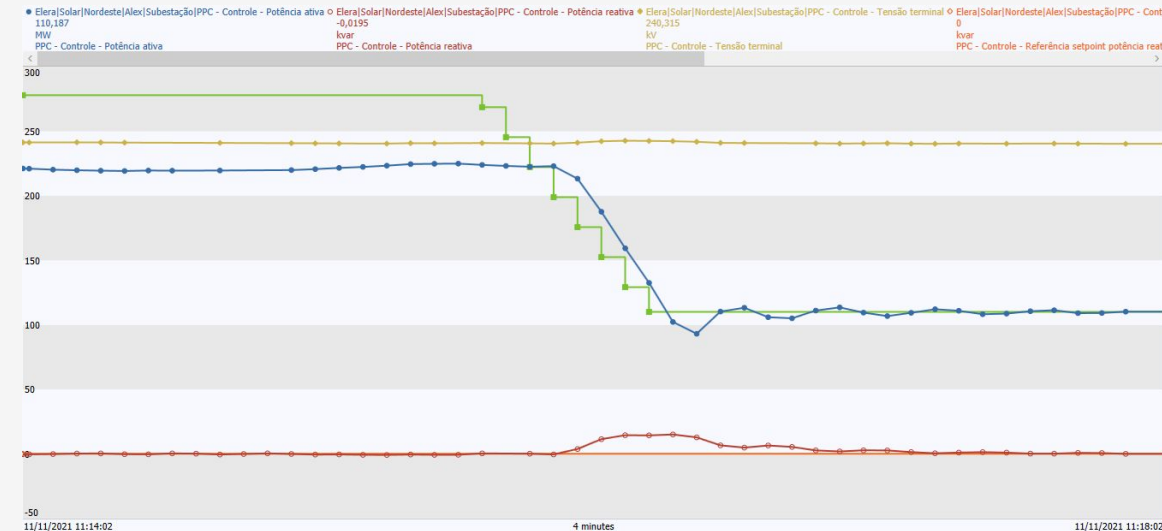
# EM FUNCIONAMENTO COMERCIAL FIM DE RESTRIÇÃO DE GERAÇÃO



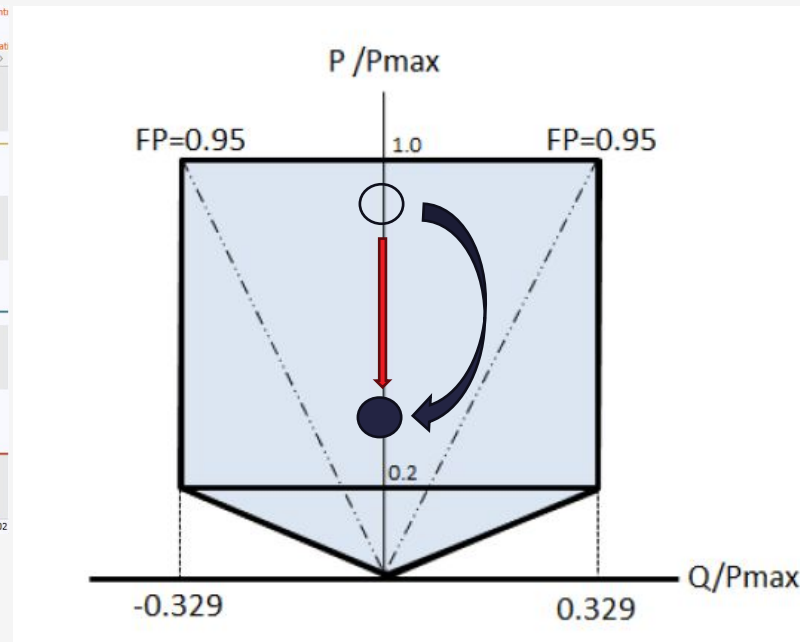
**Não alcança o setpoint de potência ativa**

- Indicativo que a usina não está mais sob restrição de geração

# EM FUNCIONAMENTO COMERCIAL INTERFERÊNCIA DE POT. ATIVA E REATIVA



Interferência de potência ativa x reativa



- Em inversores a potência ativa e reativa são controladas e modeladas de maneira independente uma da outra.
- Assim, a redução de potência ativa não deveria interferir na de potência reativa.
- No entanto acredita-se que o acoplamento está ocorrendo em razão da corrente de magnetização no transformador (potência reativa) ser dependente da potência ativa

# COMISSIONAMENTO REGISTROS DE CAMPO



COMISSIONADORES,  
PAINÉIS SOLARES DURANTE  
A CONSTRUÇÃO, E  
ELETROCENTRO.

OBRIGADO!  **REIVAX**

Rodrigo Pereira Gosmann  
rodrigo.gosmann@reivax.com



[www.reivax.com](http://www.reivax.com)





PPC – POWER PLANT  
CONTROLLER  
REIVAX



# PERIGO CONTROLE LENTO DE TENSÃO

## WSCC (EUA) 96

Trip em linha seguido de subtensão, que por sua vez ocasionou um efeito dominó

### Sequência de Eventos

1. Trip em linha de 230 kV em Oregon;
2. Redução de tensão em Idaho e Oregon;
3. Depois de 24s abertura da linha que liga Montana a Idaho;
4. (nova) Redução de tensão em Idaho e Oregon;
5. Depois de 3s Trip em 4 linhas de transmissão em Idaho;
6. Depois de 2s Trip na linha DC (HVDC) pacífico;

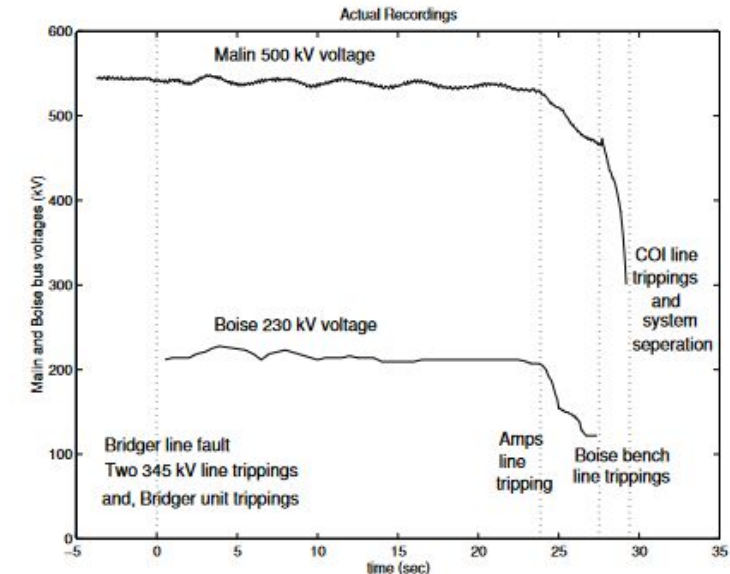
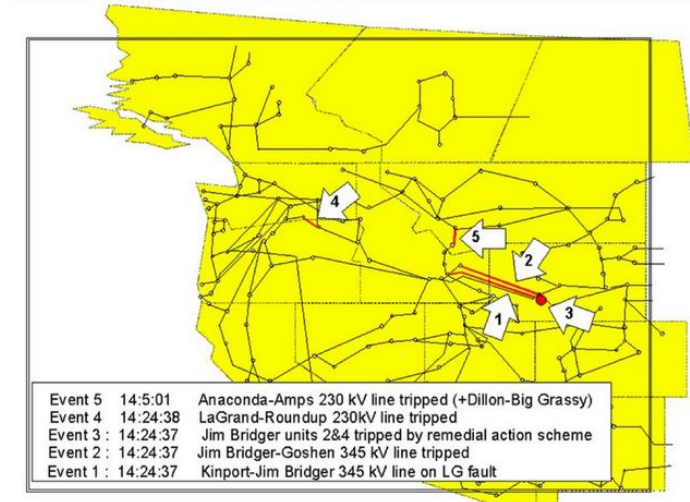
### Consequência após 35 segundos do distúrbio inicial?

- 2 milhões de consumidores ficaram sem energia

### Medidas de controle:

- Um controle rápido de tensão poderia ter interrompido a sequência de eventos no item 2 ou 4.

## WSCC July 2, 1996 Disturbance (cont'd)



# REQUISITO PRINCIPAIS DO



- O ONS estabelece que o modo de controle de **tensão terminal** é o **modo normal de funcionamento** para o serviço ancilar, exceto se o ONS autorizou o funcionamento da usina em outro modo de controle.

## GERAÇÃO

- Potência Ativa

## ANCILAR

- Tensão Terminal
- Potência Reativa
- Fator de Potência

