



Estudos de Caso

Celso Rocha e Paulo Radatz

1º Encontro do Grupo de Usuários do
OpenDSS Brasil
05/09/2017



Estudo de Caso 1

Análise e Mitigação de Impactos da Conexão de Geração Distribuída em
uma Rede de Distribuição

Visão Geral

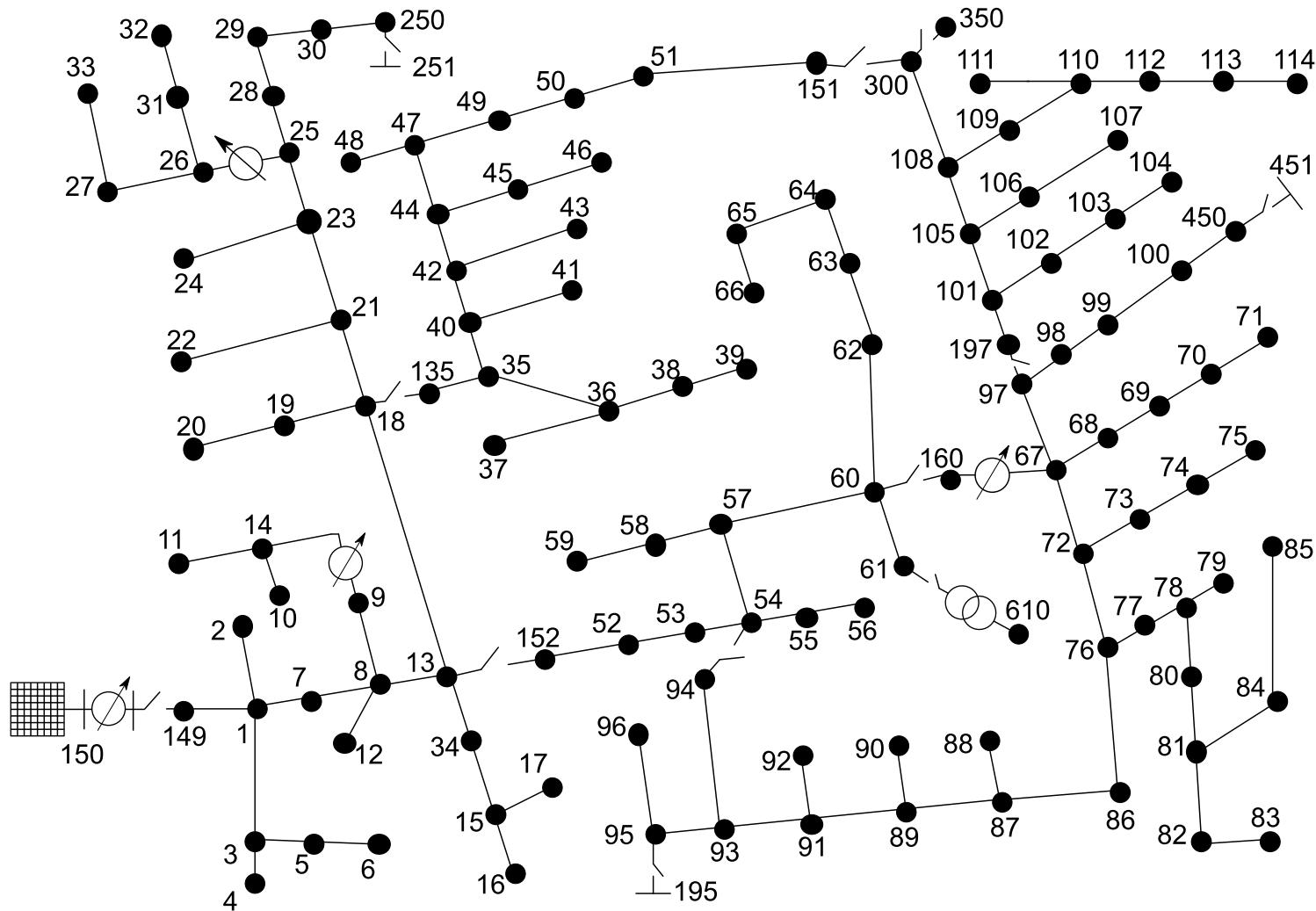
- Objetivos
- Metodologia
- Resultados
- Conclusão
- Referências

Objetivos

- Analisar o impacto da inserção de geração solar fotovoltaica com alta intermitência em uma rede de distribuição de testes na operação dos reguladores de tensão dessa rede
- Desenvolver/Implementar métodos de controle para mitigar o impacto estudado
- Comparar o desempenho dos métodos implementados

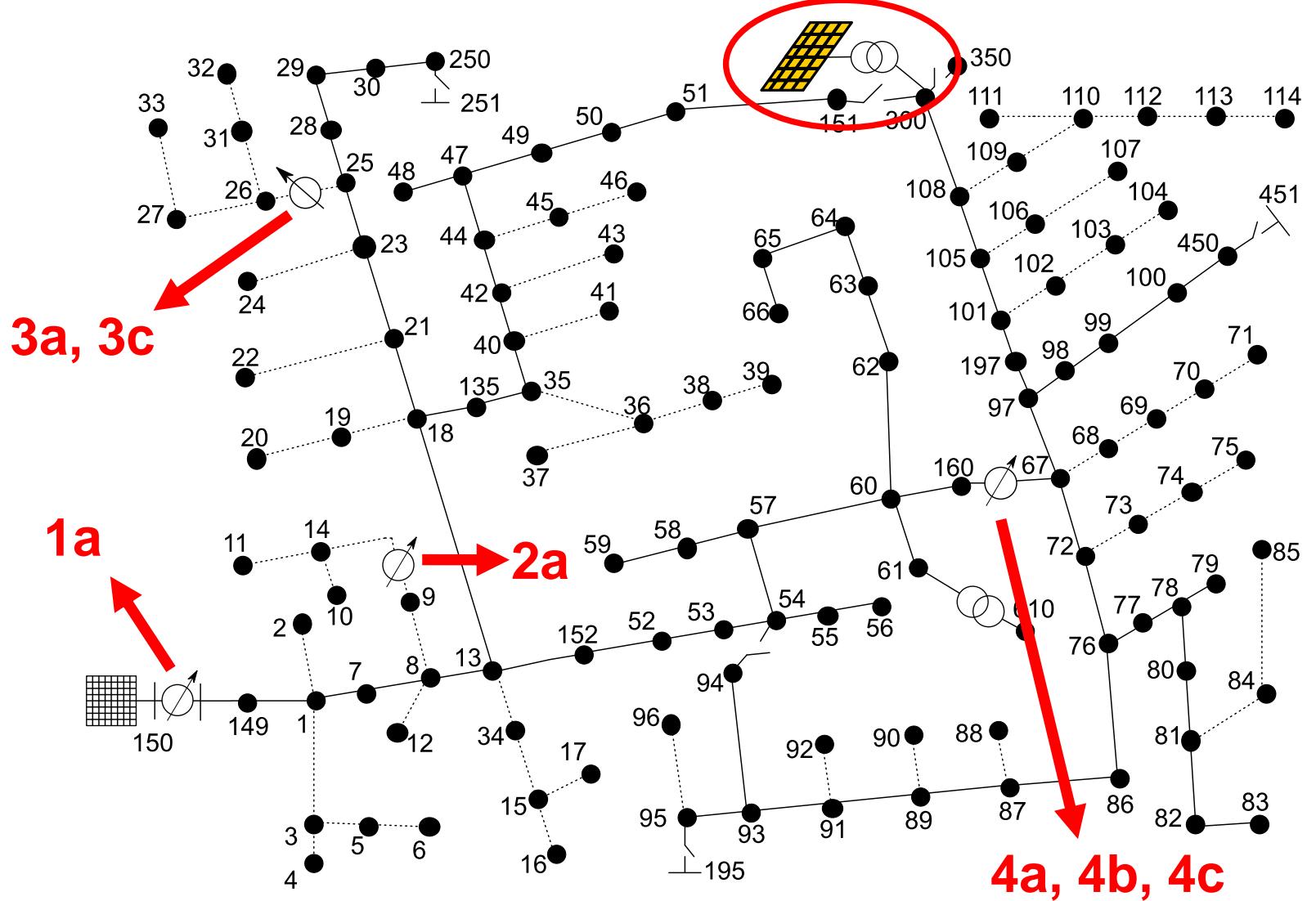
Metodologia

■ A rede IEEE 123 Barras :



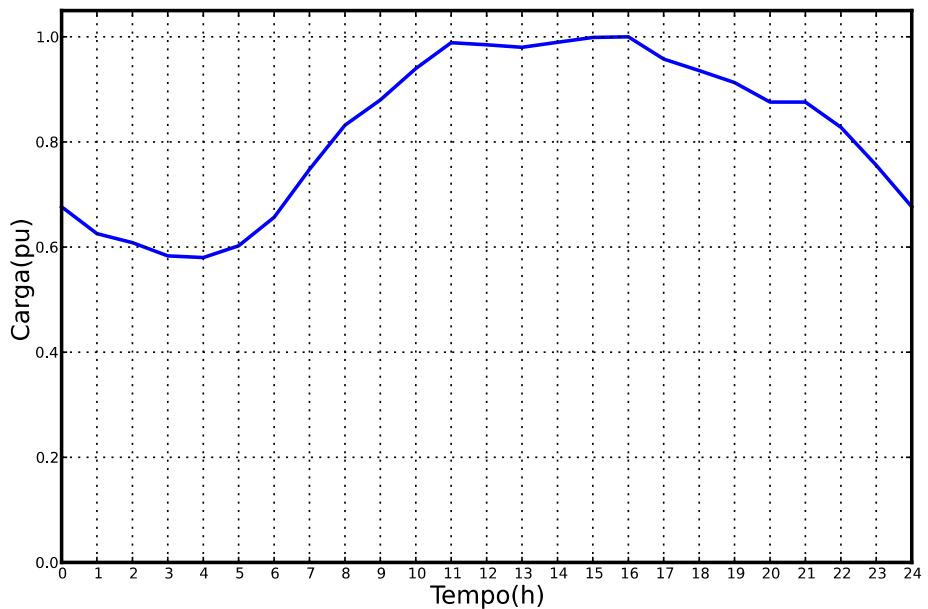
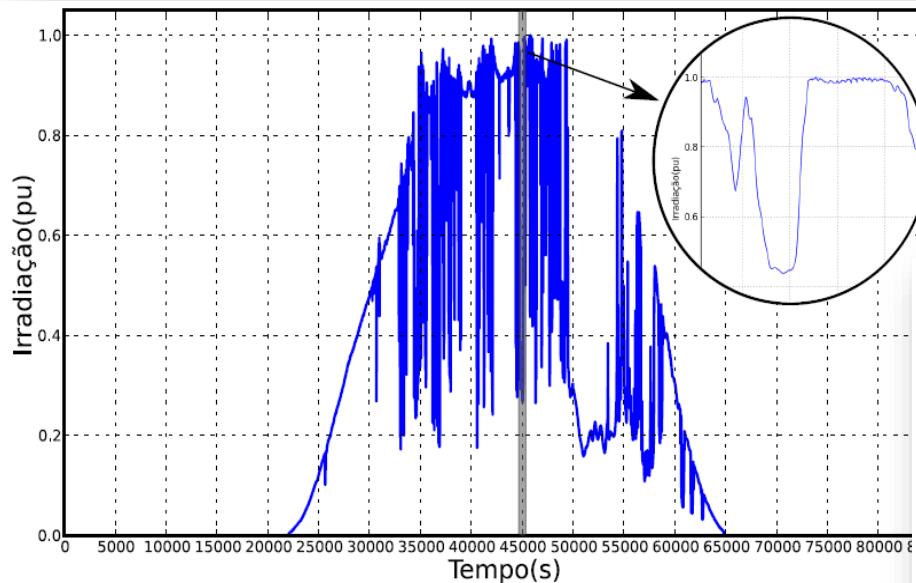
Metodologia

- A rede IEEE 123 Barras :



Metodologia

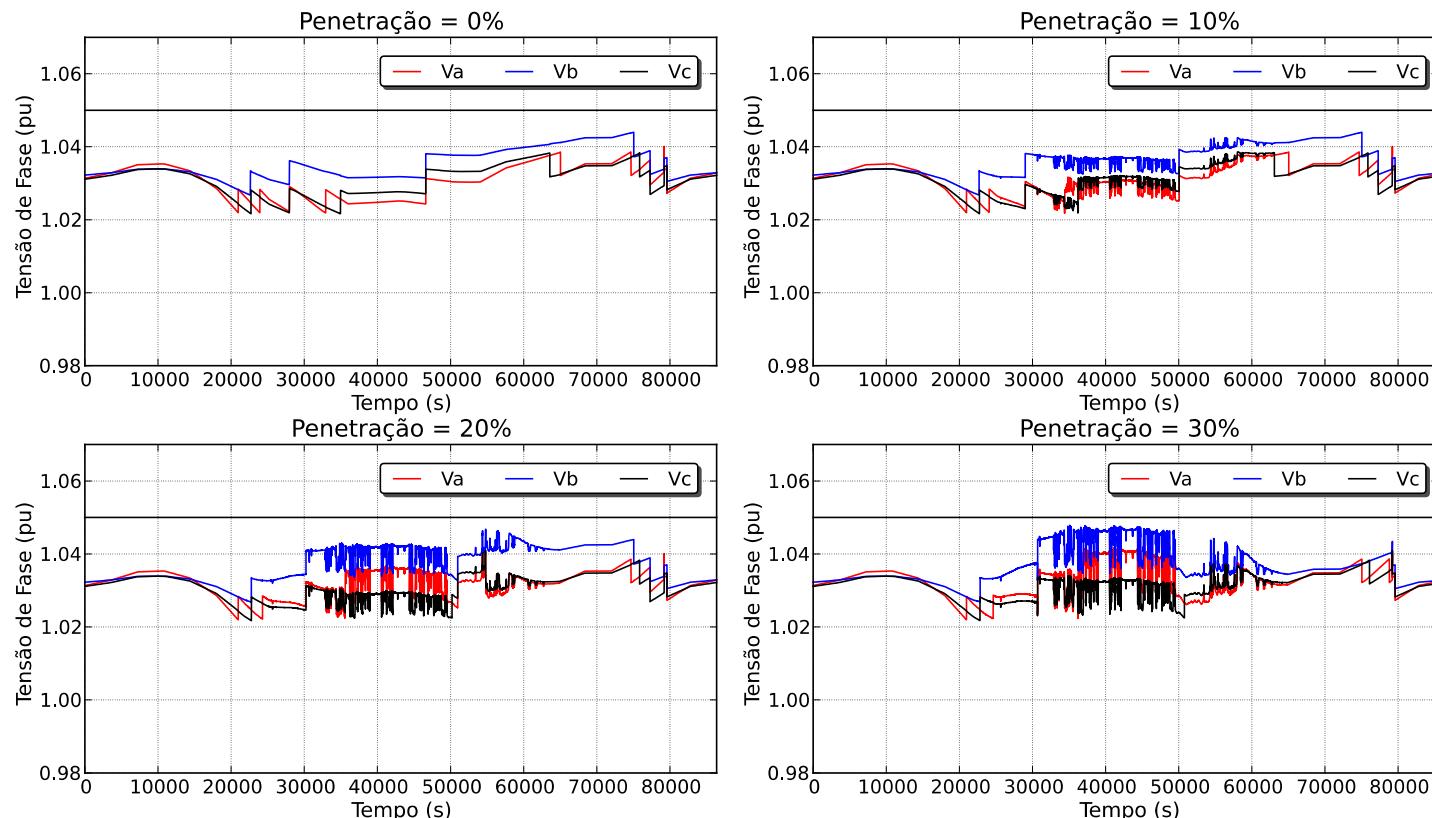
- Simulação do tipo QSTS (Quase-Static Time Series)
- 1 dia, com passo de tempo de 1 segundo
- Curvas utilizadas:



Metodologia

■ Análise do problema

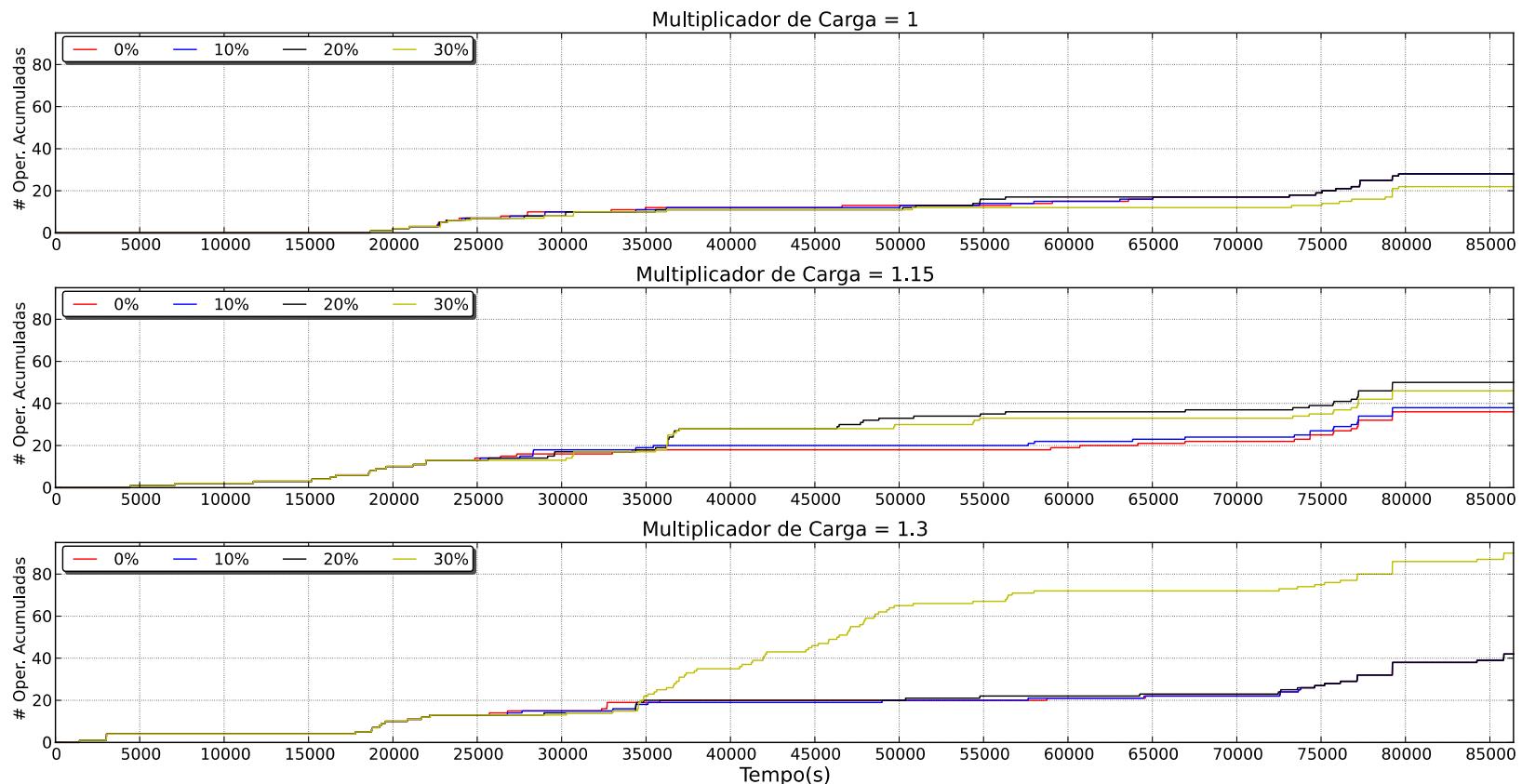
- O efeito de diferentes níveis de penetração na tensão do ponto de conexão do sistema fotovoltaico



Metodologia

■ Análise do problema

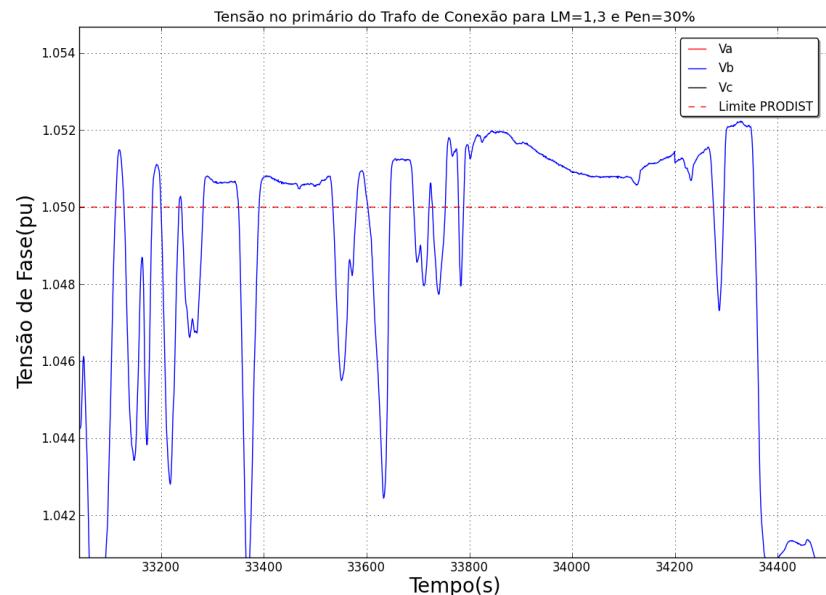
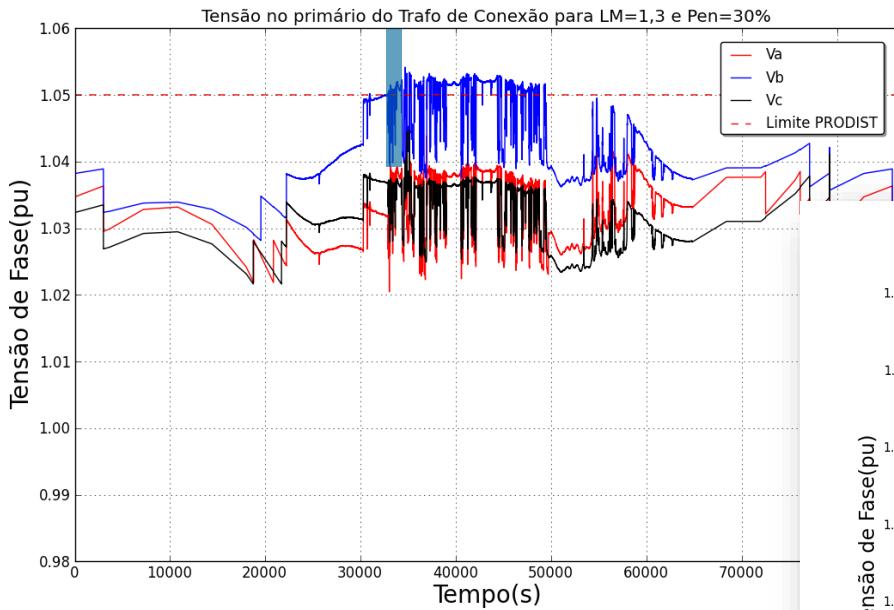
- Definição de cenários
- Número acumulado de operações dos reguladores de tensão



Metodologia

■ Análise do Problema

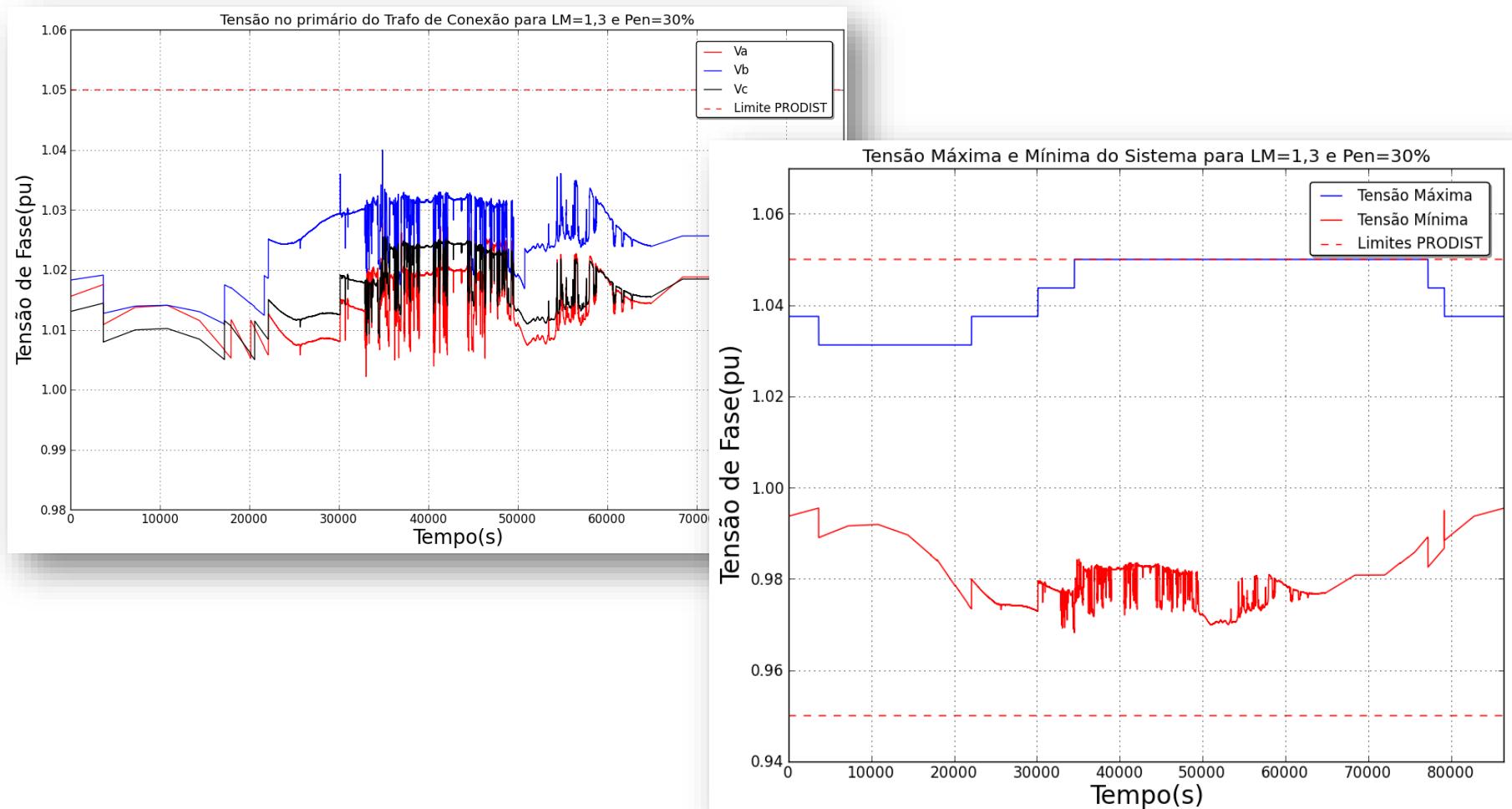
- Tensão no ponto de conexão para LM=1,3 e Pen=30%
- Fase B fora dos limites estabelecidos pelo PRODIST



Metodologia

■ Análise do Problema

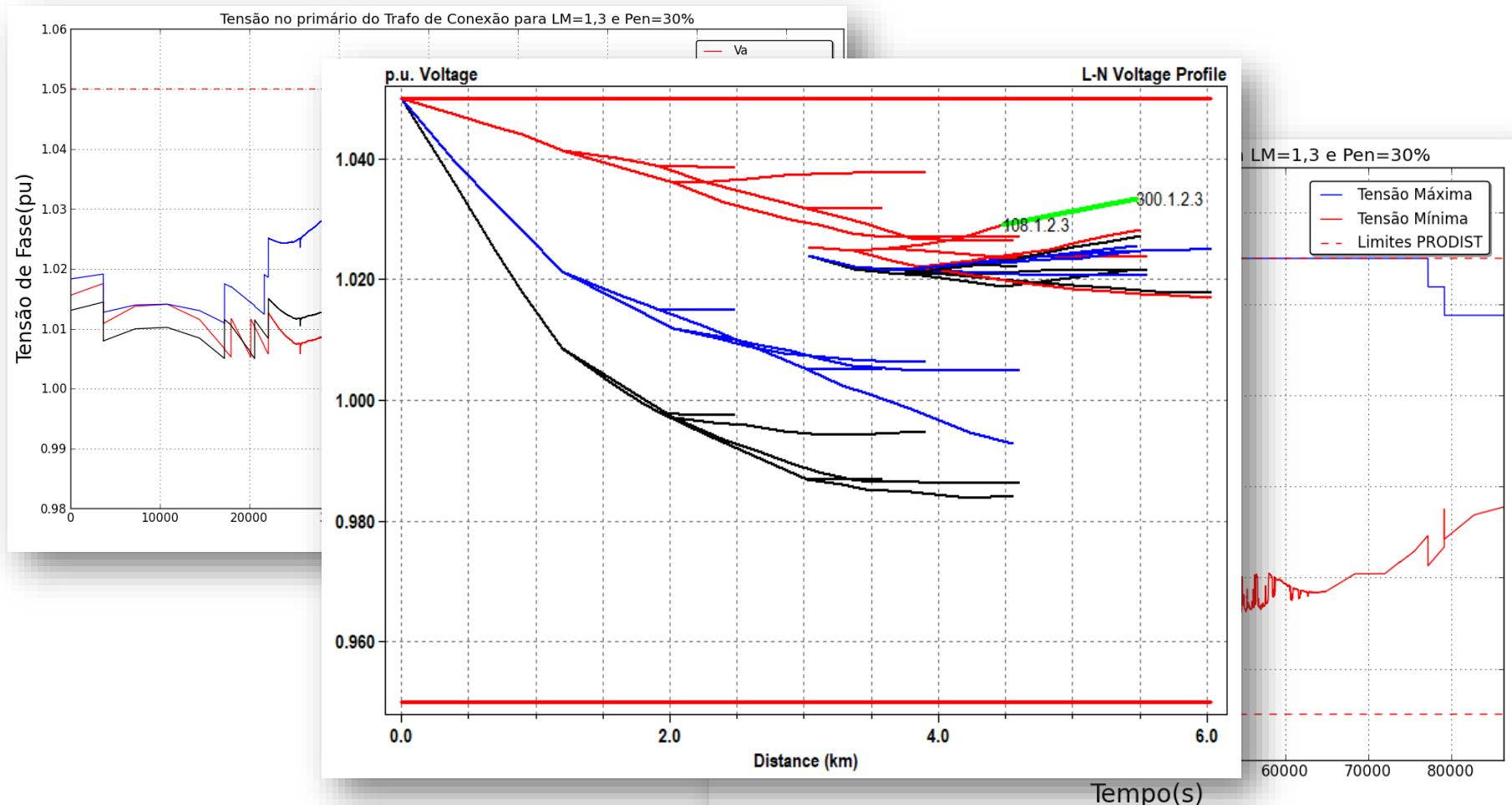
- Ajuste do *setpoint* dos reguladores 4A, 4B e 4C



Metodologia

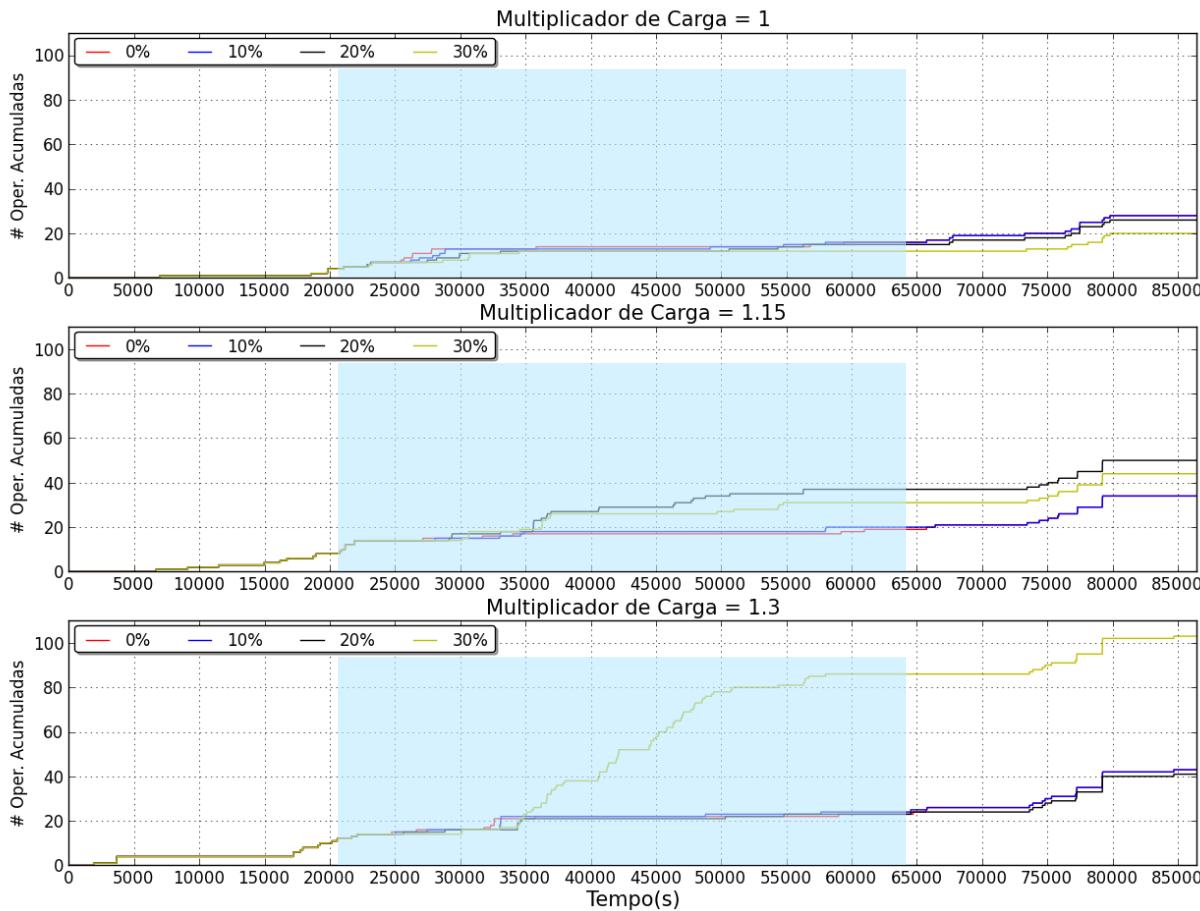
■ Análise do Problema

- Ajuste do *setpoint* dos reguladores 4A, 4B e 4C



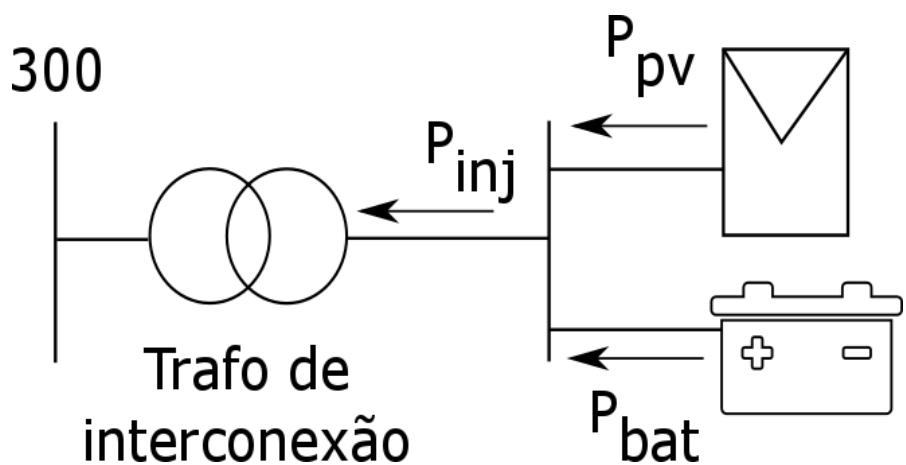
Metodologia

- Análise do Problema
 - Definição de cenários
 - Número acumulado de operações dos reguladores de tensão



Metodologia

■ Mitigação

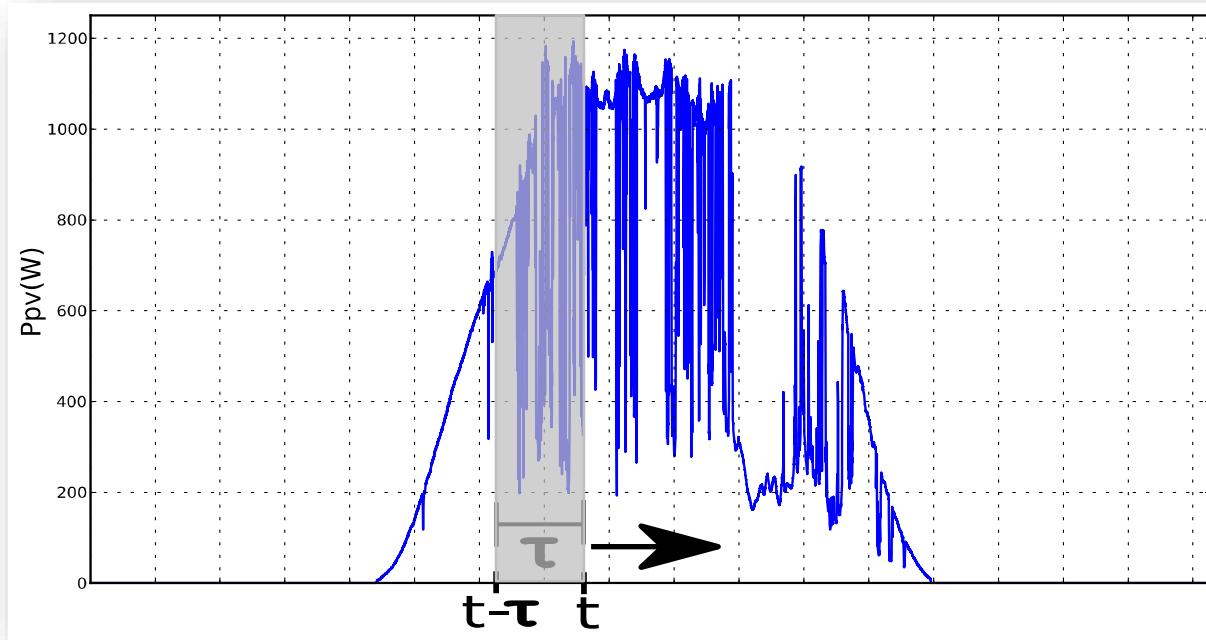


➤ Necessidade de filtrar a variação de tensão

- Baterias em paralelo com o PV
- Compensação da potência injetada na rede
- Estimativa da potência desejada através de uma média móvel

Metodologia

■ Média Móvel:



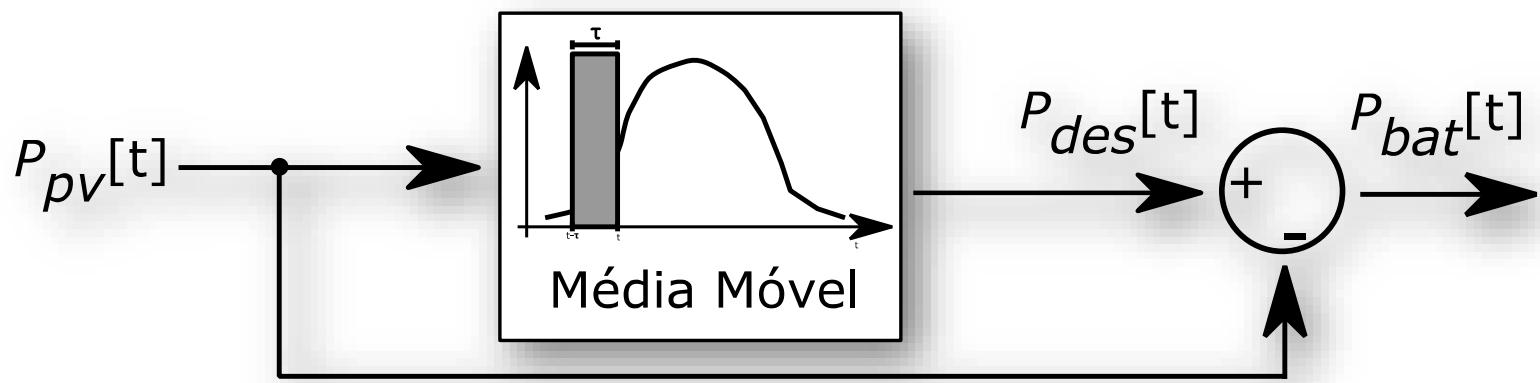
$$P_{des}(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t P_{pv}(t) dt$$

$$P_{des}[t] = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} P_{pv}[t - i]$$

Metodologia

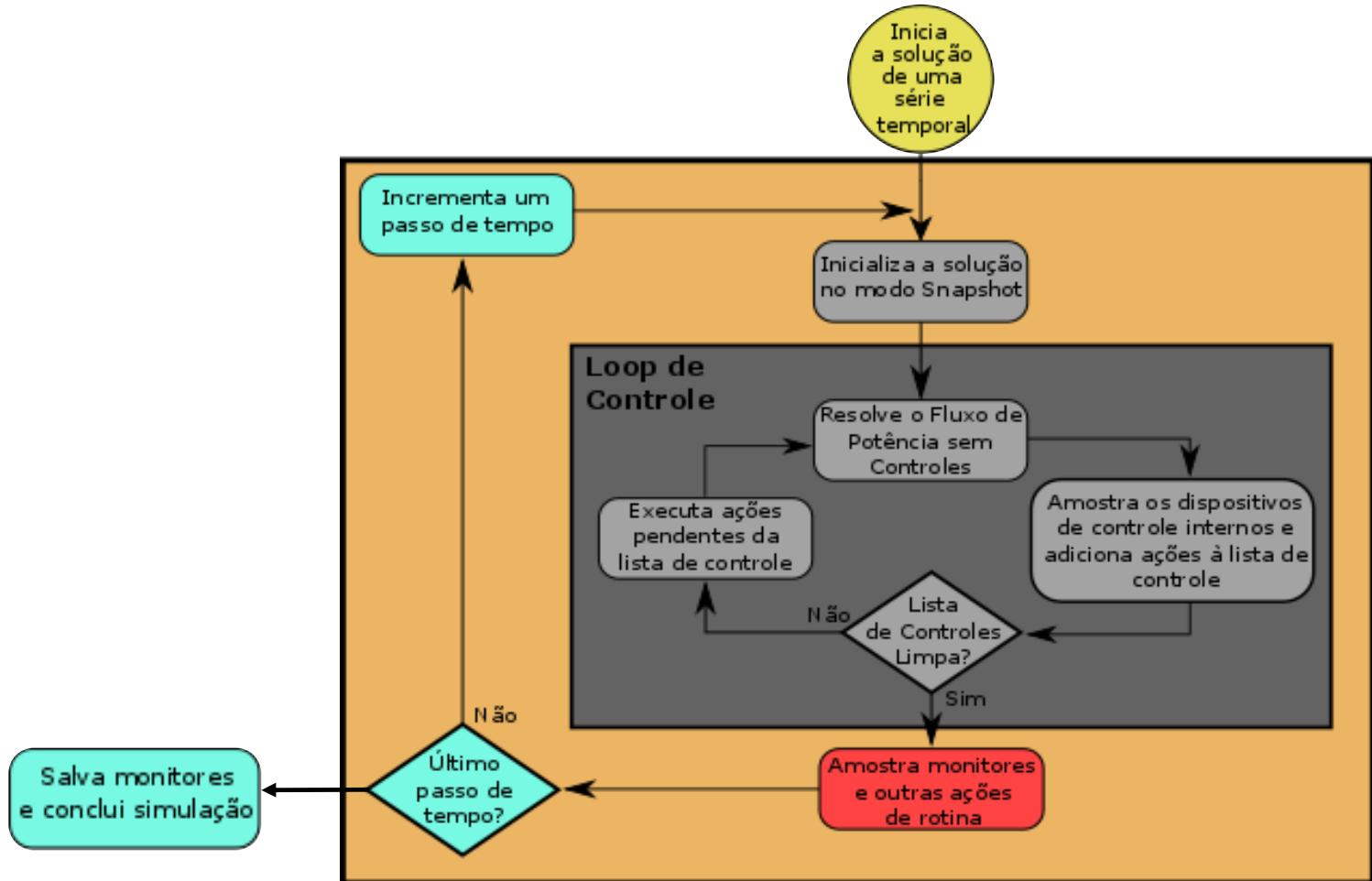
■ Média Móvel:

$$P_{bat}[t] = P_{des}[t] - P_{pv}[t]$$



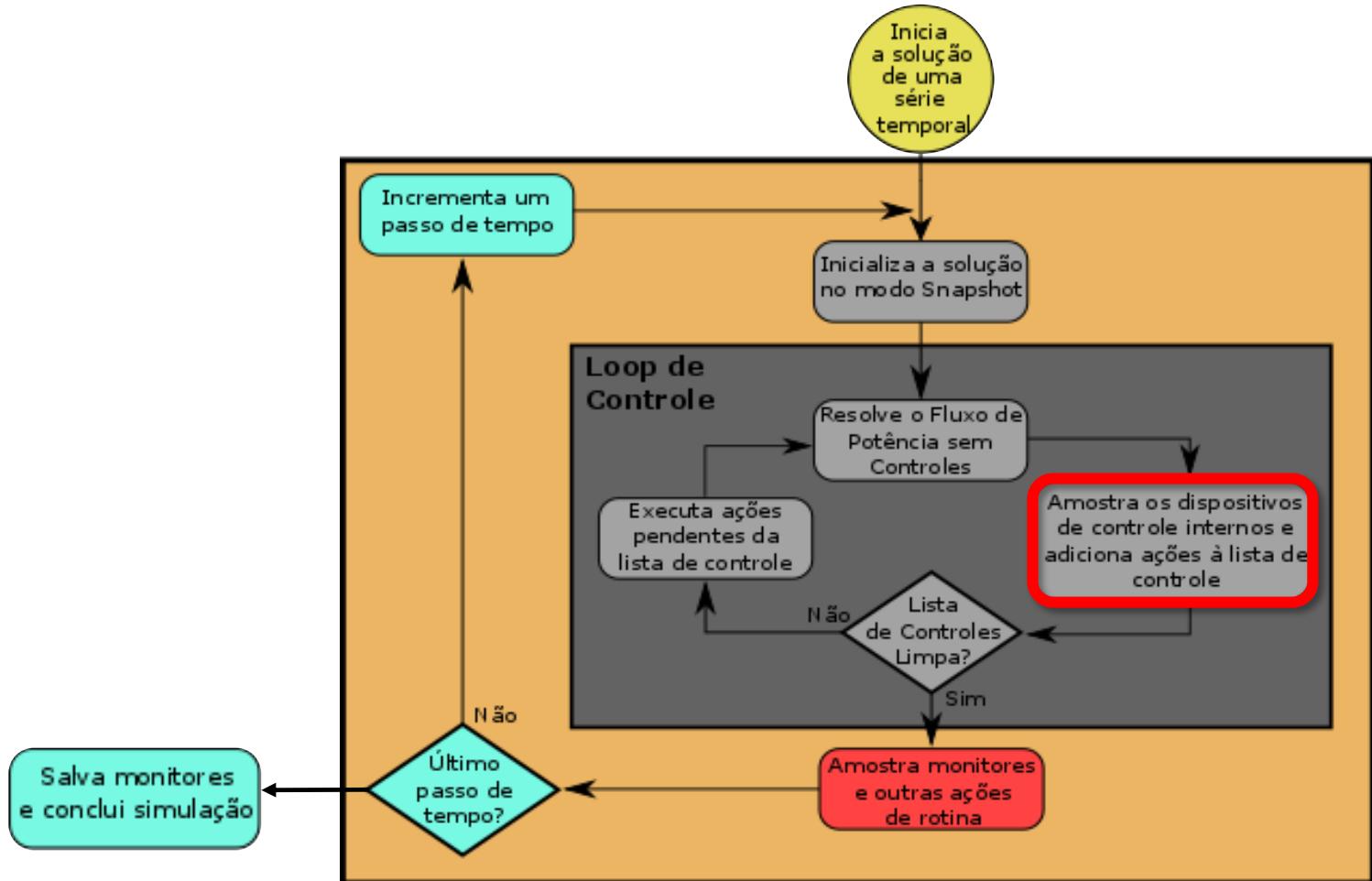
Metodologia

■ O processo de solução do OpenDSS



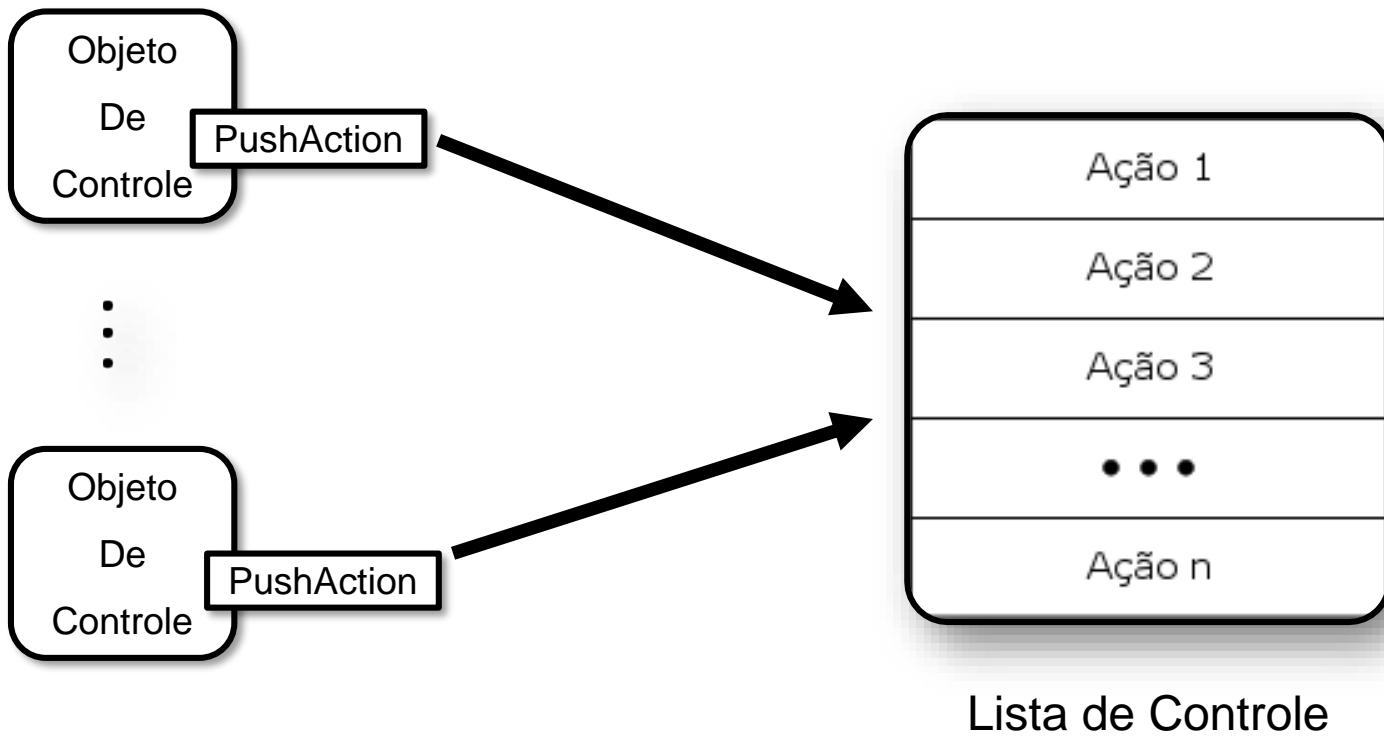
Metodologia

▪ O processo de solução do OpenDSS



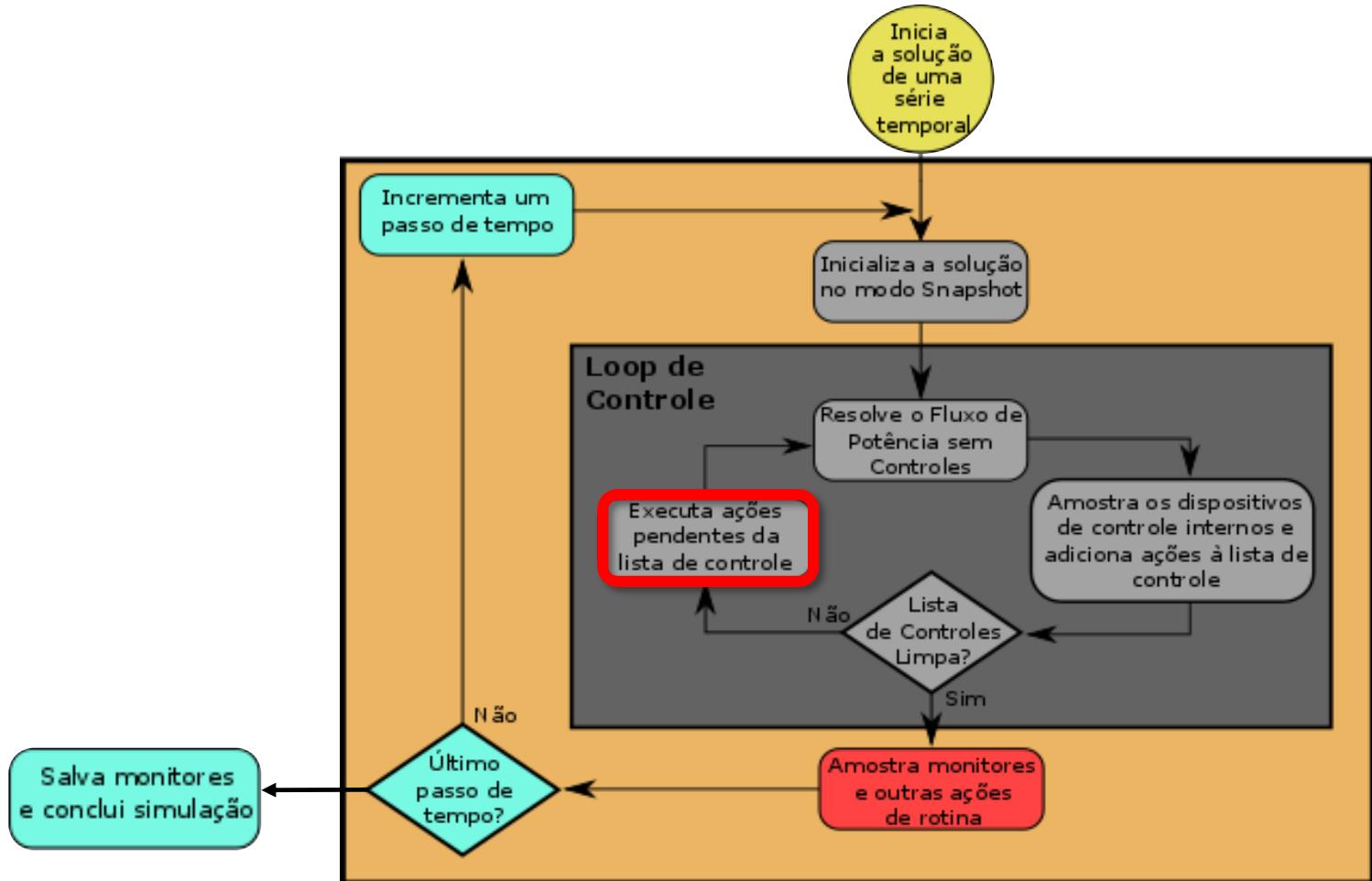
Metodologia

- O processo de solução do OpenDSS



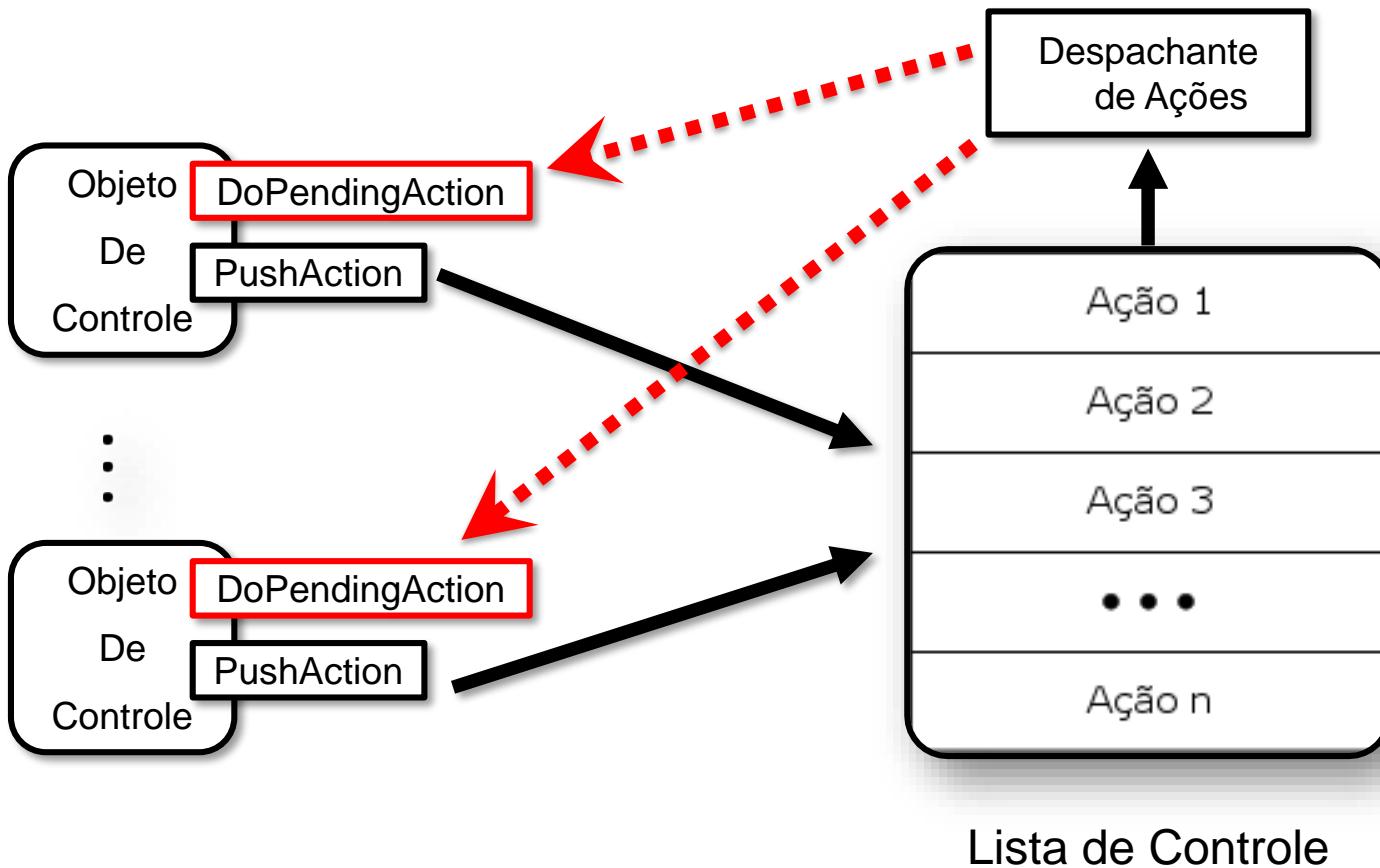
Metodologia

▪ O processo de solução do OpenDSS



Metodologia

- O processo de solução do OpenDSS

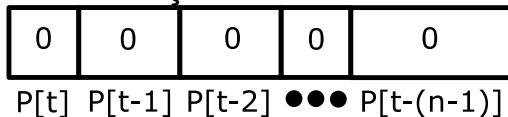


Metodologia

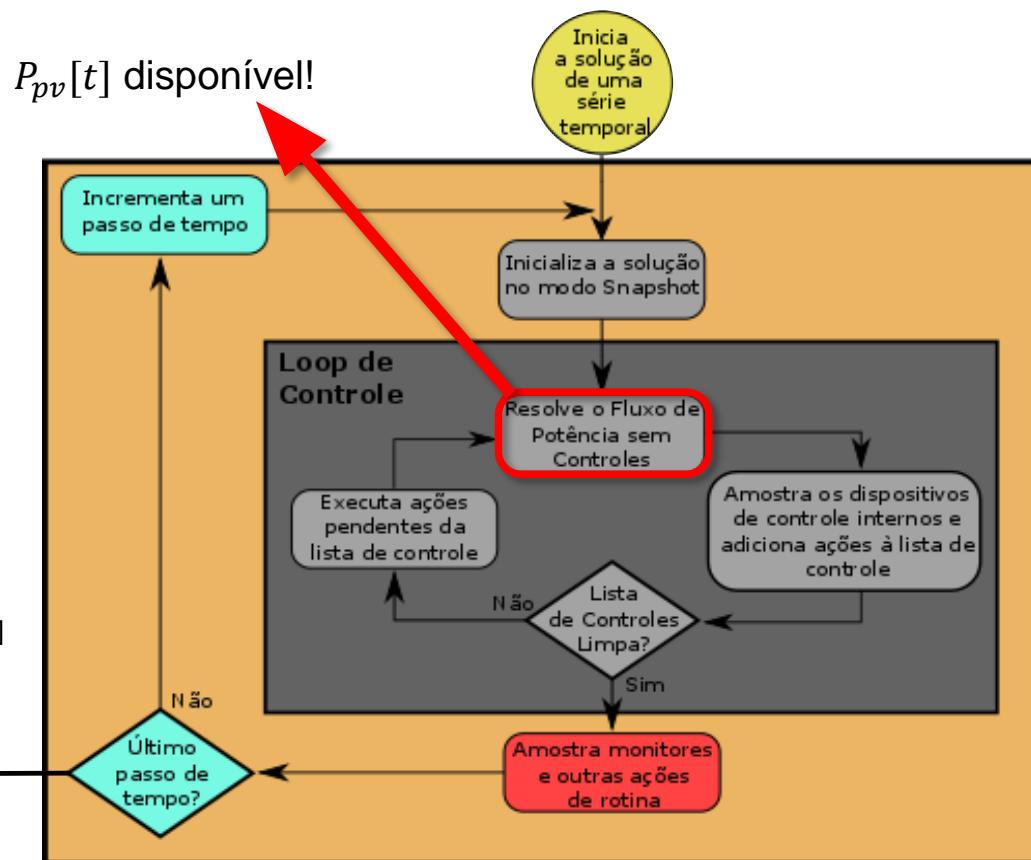
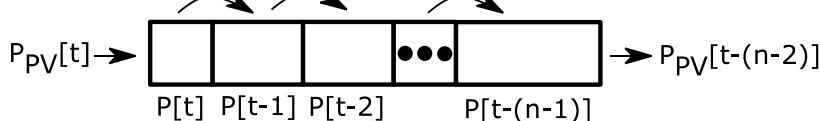
▪ Média Móvel: Implementação

Registrador de deslocamento:

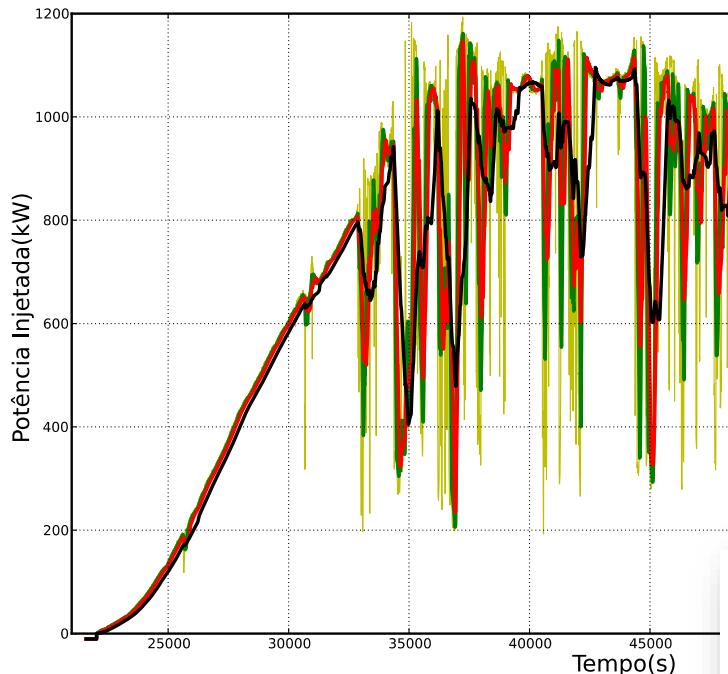
Inicialização



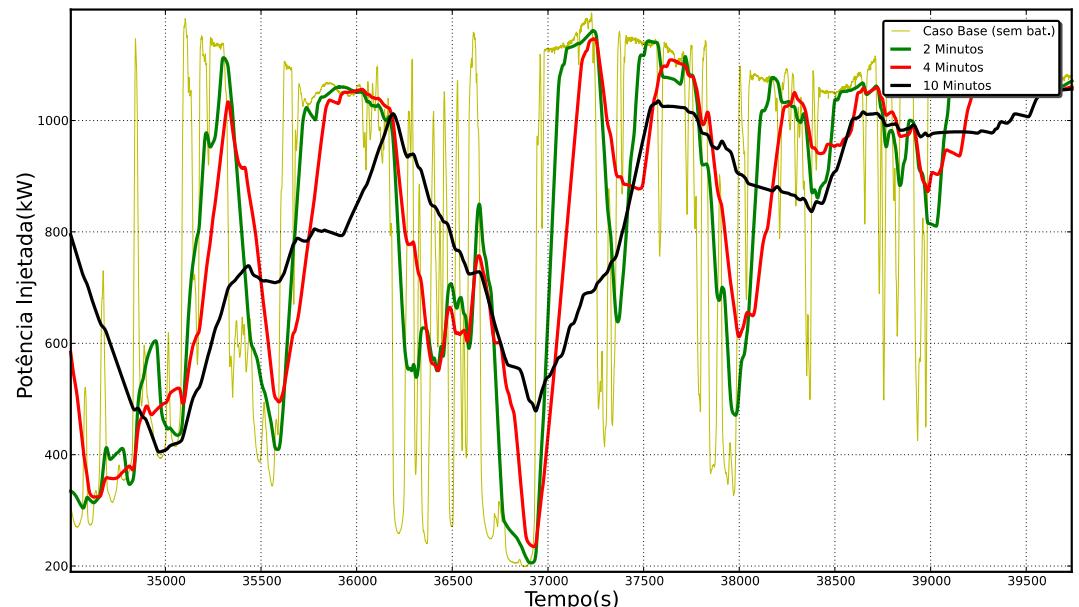
Deslocamento para a “direita”



Resultados

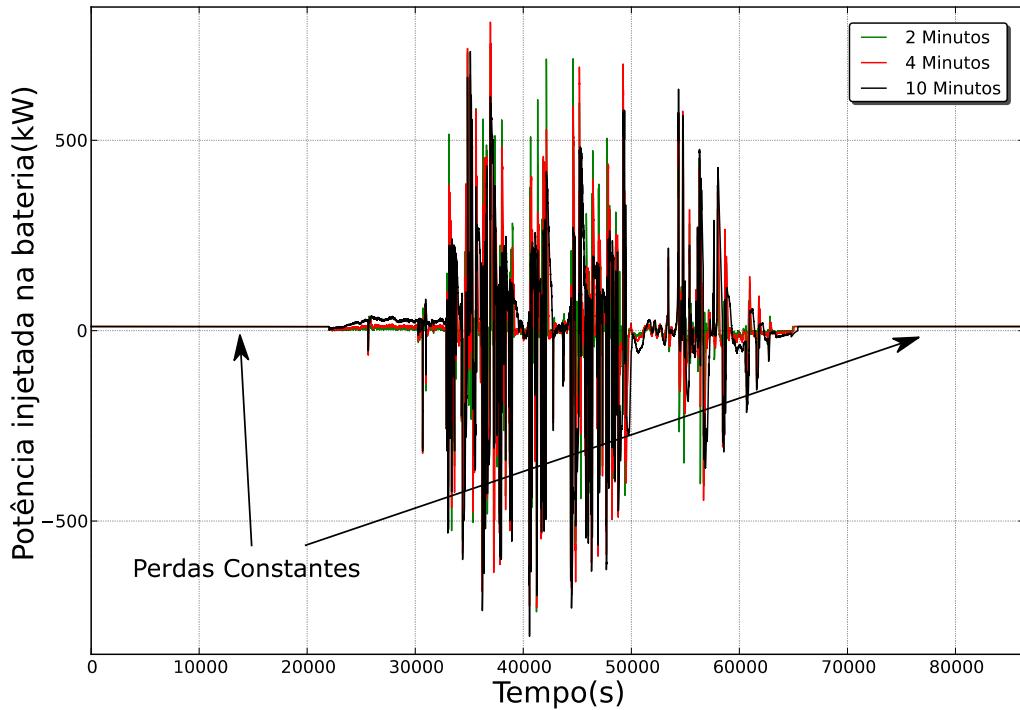


- Multiplicador de carga: 1,3
- Penetração de 30%
- Janelas de 2, 4 e 10 Minutos



- Média Móvel atua como um filtro
- Quanto maior a janela, maior a filtragem
- Atraso inerente ao método

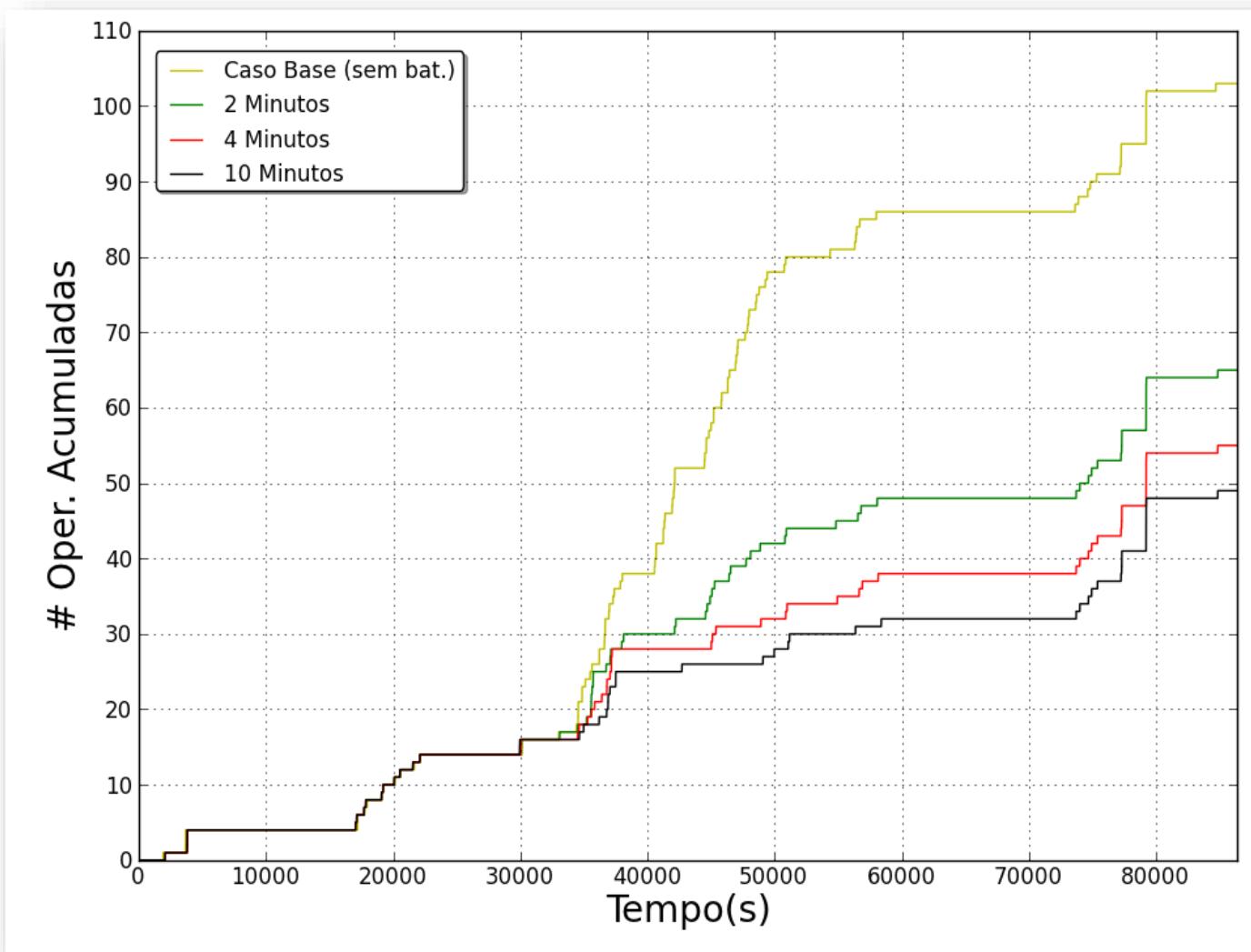
Resultados



- Bateria carrega e descarrega durante a operação do algoritmo
- Quando ilhada, apresenta perdas constantes, supridas pela rede

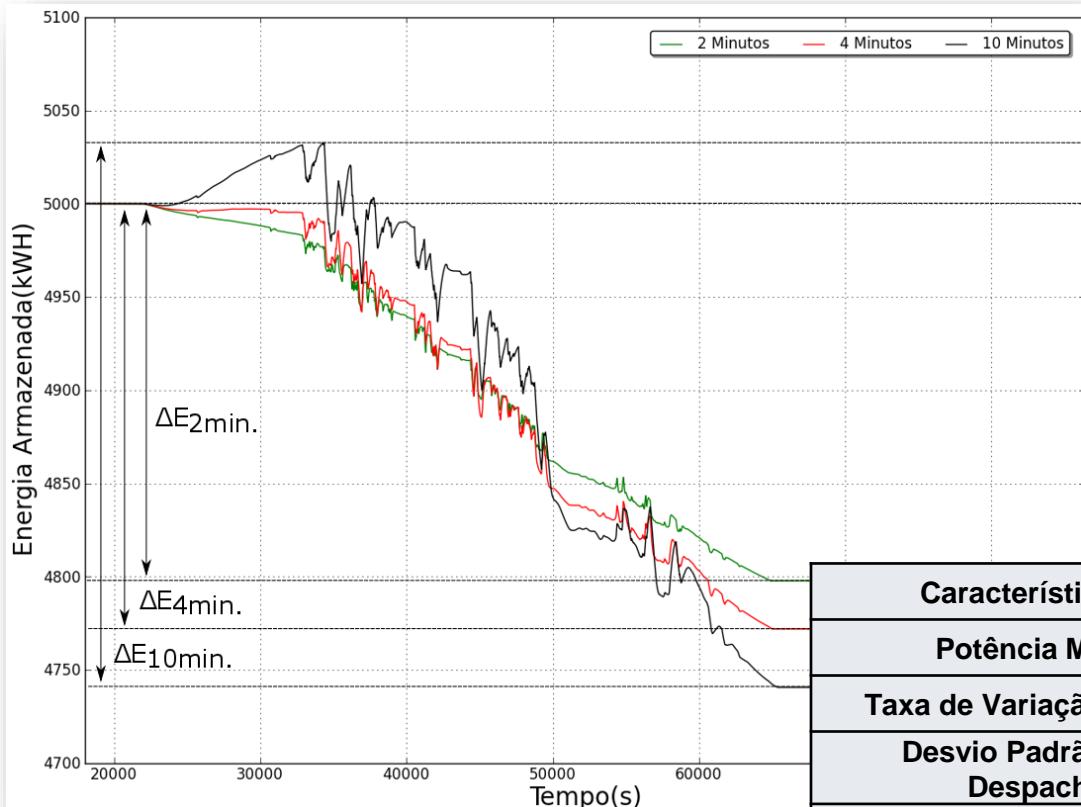
Resultados

- Quanto ao número de operações dos reguladores



Resultados

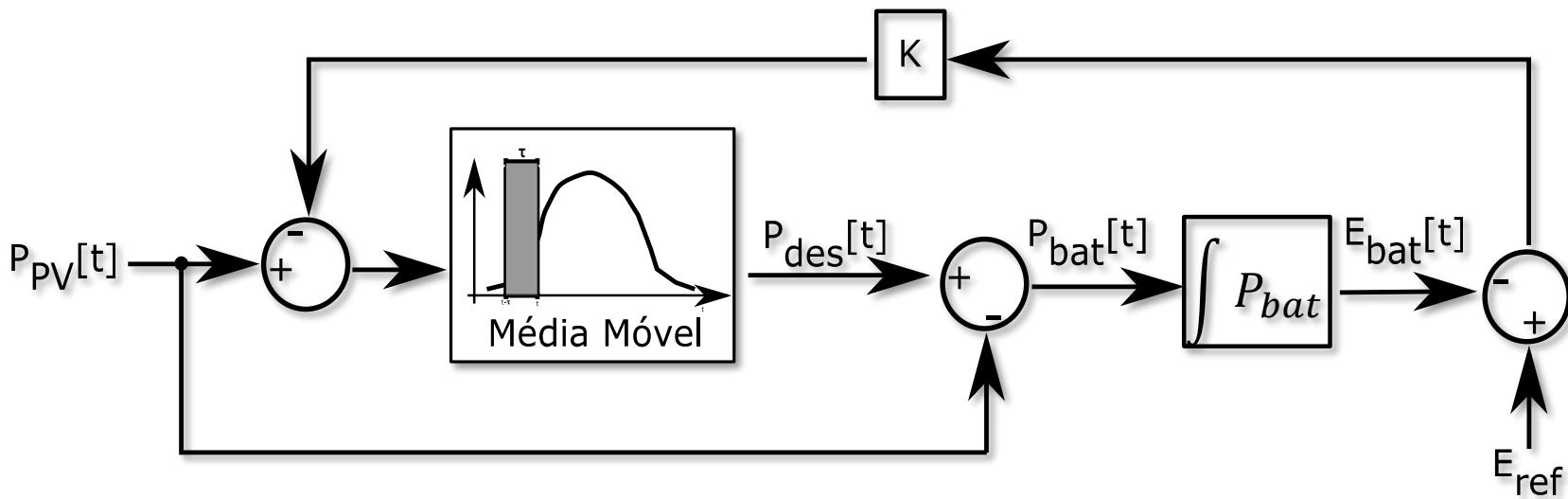
- Quanto às especificações mínimas da bateria



Característica da bateria	Duração da Janela da Média Móvel		
	2 Min.	4 Min.	10 Min.
Potência Máxima (kW)	751,1	810,4	802,8
Taxa de Variação Máxima (kW/s)	91,43	89,94	88,91
Desvio Padrão da Potência Despachada (kW)	123,4	146,8	165,5
Perdas por ilhamento (kWh)	124,0	124,5	125,3
Perdas por carga e descarga (kWh)	78,0	103,5	133,7
Perdas Totais (kWh)	202,25	228,02	259,00
ΔE , Capacidade Mínima (kWh)	202,25	228,02	295,23

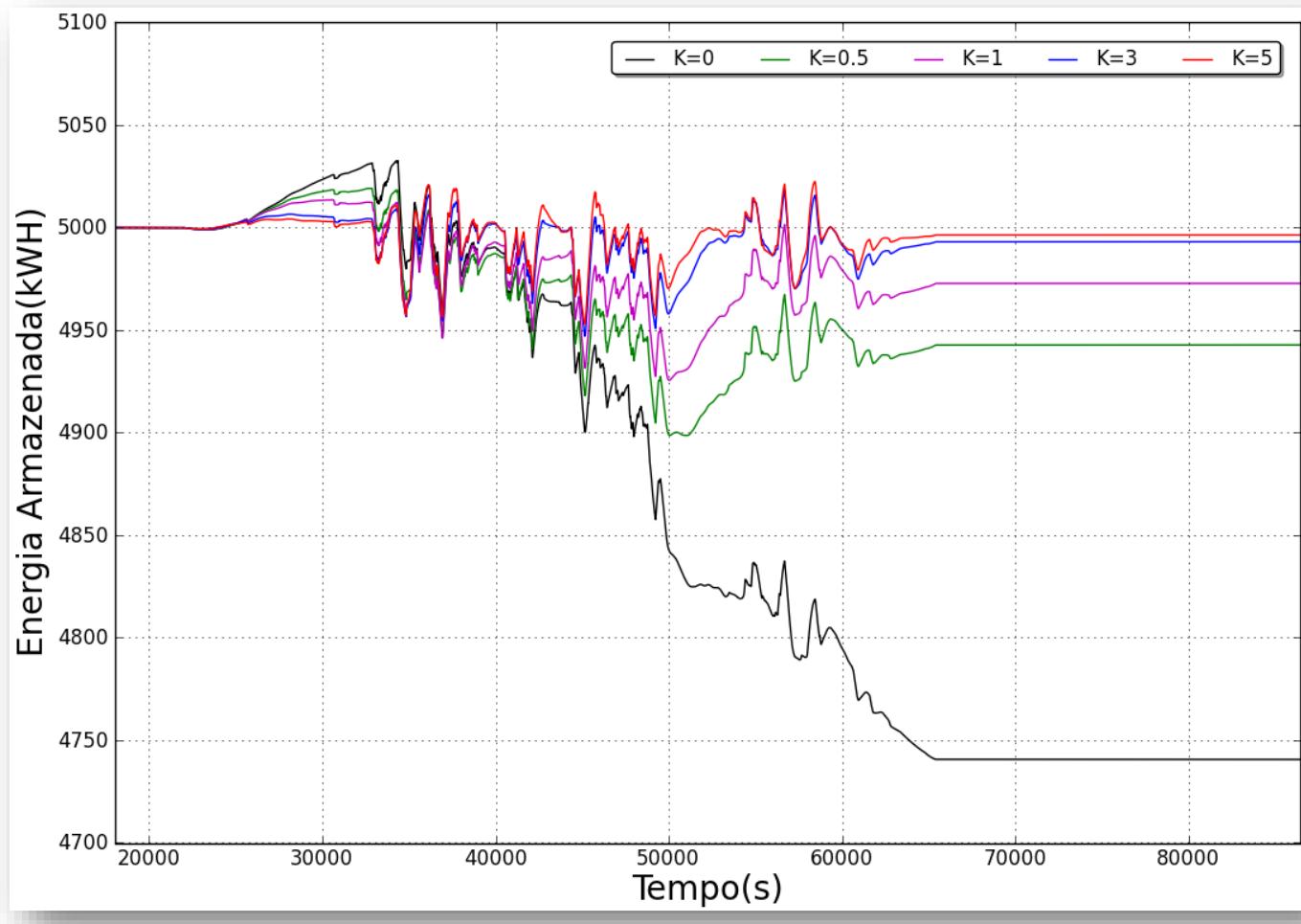
Metodologia

- Aprimorando o método

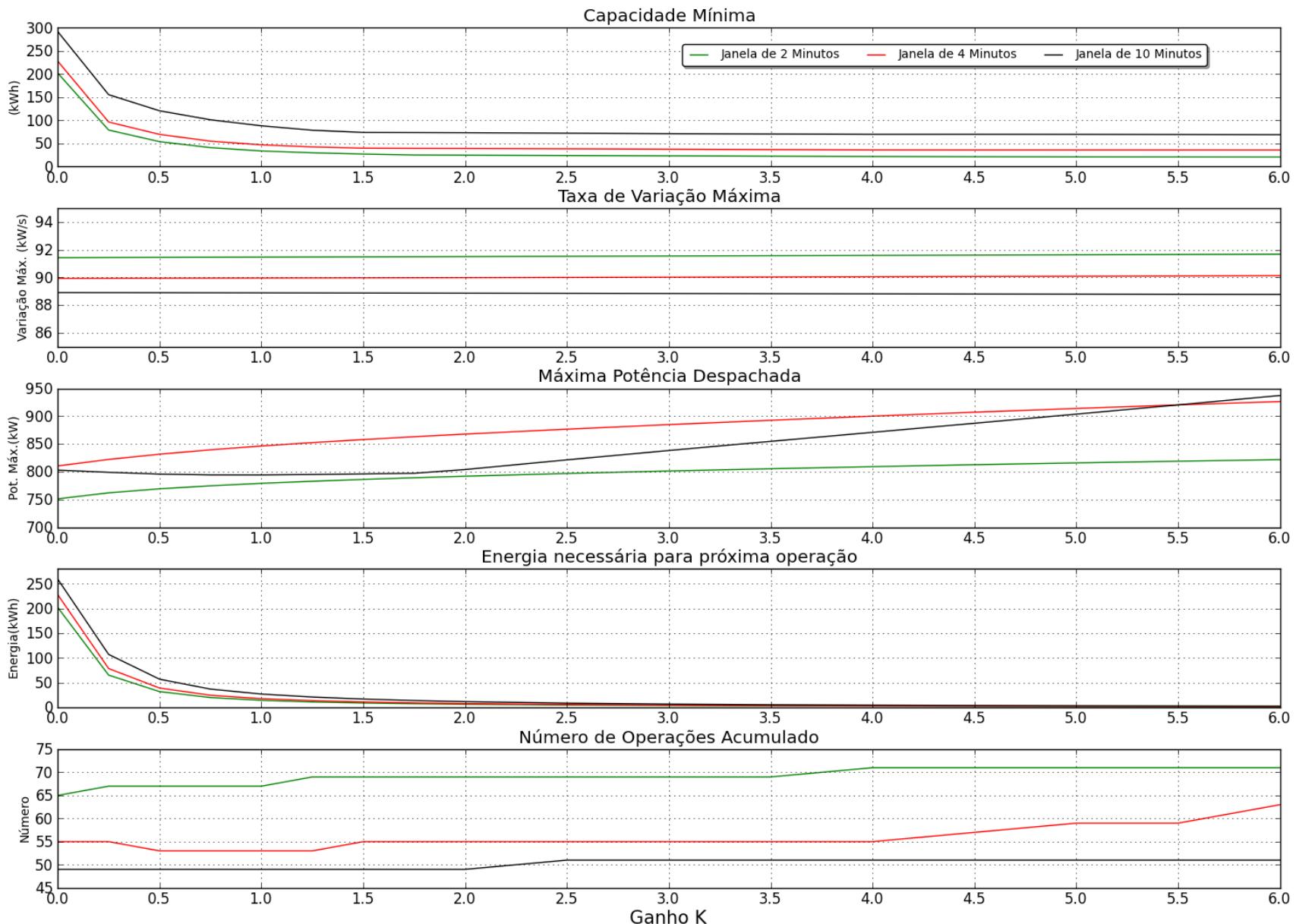


Resultados

- Evolução do SOC da bateria para janela de 10 minutos e diferentes ganhos K



Resultados



Resultados

	Sem PV e Multiplicador de 1,3	Com PV(30%) e Multiplicador de 1,3 (Base)	Média Móvel de 10 minutos	Média Móvel de 10 minutos e SOC(K=2)
Número acumulado de mudanças de Tap	43	103	49	49
Energia Necessária para a próxima operação	-	-	259 kWh	10 kWh
Potência Máxima	-	-	802,8 kW	810 kW
Capacidade Mínima	-	-	295,23 kWh	75 kWh
Taxa de Variação Máxima	-	-	88,91 kW/s	88,90 kW/s
Perdas por Carga e Descarga	-	-	133,7 kWh	135,60 kWh

Conclusão

- Alta Penetração de GD com elevada intermitência pode afetar significativamente a operação dos equipamentos de regulação de tensão tradicionais
- O uso de baterias em paralelo com a GD, operando com a estratégia de controle baseado em média móvel mostrou-se capaz de reduzir o stress operacional dos reguladores da rede
- O método pode ser aprimorado para reduzir as especificações das baterias

Conclusão

- Pontos Relevantes:

- Preço das baterias
 - Avaliar outras alternativas (Relaxamento das configurações dos reguladores, inversor operando com corrente reativa dinâmica e operação como objetivo secundário)
- Bateria centralizada x Bateria distribuída:
 - Bateria de grande porte centralizada com despacho controlado pela distribuidora ou um conjunto de baterias distribuídas com controle local?
- Custo de uma operação do regulador de tensão:
 - Converter número de operações em aumento da vida útil e em economia financeira
- Variabilidade do recurso solar em um longo período

Referências

- BOLLEN, M. H.; HASSAN, F. **Integration of Distributed Generation in the Power System.** [S.I.]: Wiley-IEEE Press, 2012. 527 p.
- BASS, R. B. et al. Determining the power and energy capacities of a battery energy storage system to accommodate high photovoltaic penetration on a distribution feeder. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, 2016. v. 3, n. 3, p. 119–127, Sept 2016.
- K PORTER, C. M.; WEISBURGER, M. **Reglamento para la interconexión de generadores al sistema de transmisión y subtransmisión eléctrica para el programa de medición neta.** [S.I.], Junho 2013. 31 p.
- LIU, X. et al. Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2012. v. 3, n. 2, p. 897–906, June 2012. ISSN 1949-3053.

Referências

- MARCOS, J. et al. Smoothing of pv power fluctuations by geographical dispersion. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 2012. John Wiley and Sons, Ltd, v. 20, n. 2, p. 226–237, 2012. ISSN 1099-159X.
Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/pip.1127>>.
- PORTER, C. M. K.; WEISBURGER, M. **Review of International Experience Integrating Variable Renewable Energy Generation**. [S.I.], 2007.
- Marcos, J. et al. Storage requirements for pv power ramp-rate control. Solar Energy, 2014. v.99, p. 28-35.

Estudo de Caso 2

Assessing maximum DG penetration levels in a real distribution feeder
by using OpenDSS

Visão Geral

- Cenário e Objetivo
- Modelagem do Sistema no OpenDSS
- Simulações
- Resultados

Cenário e Objetivo

■ Sistema

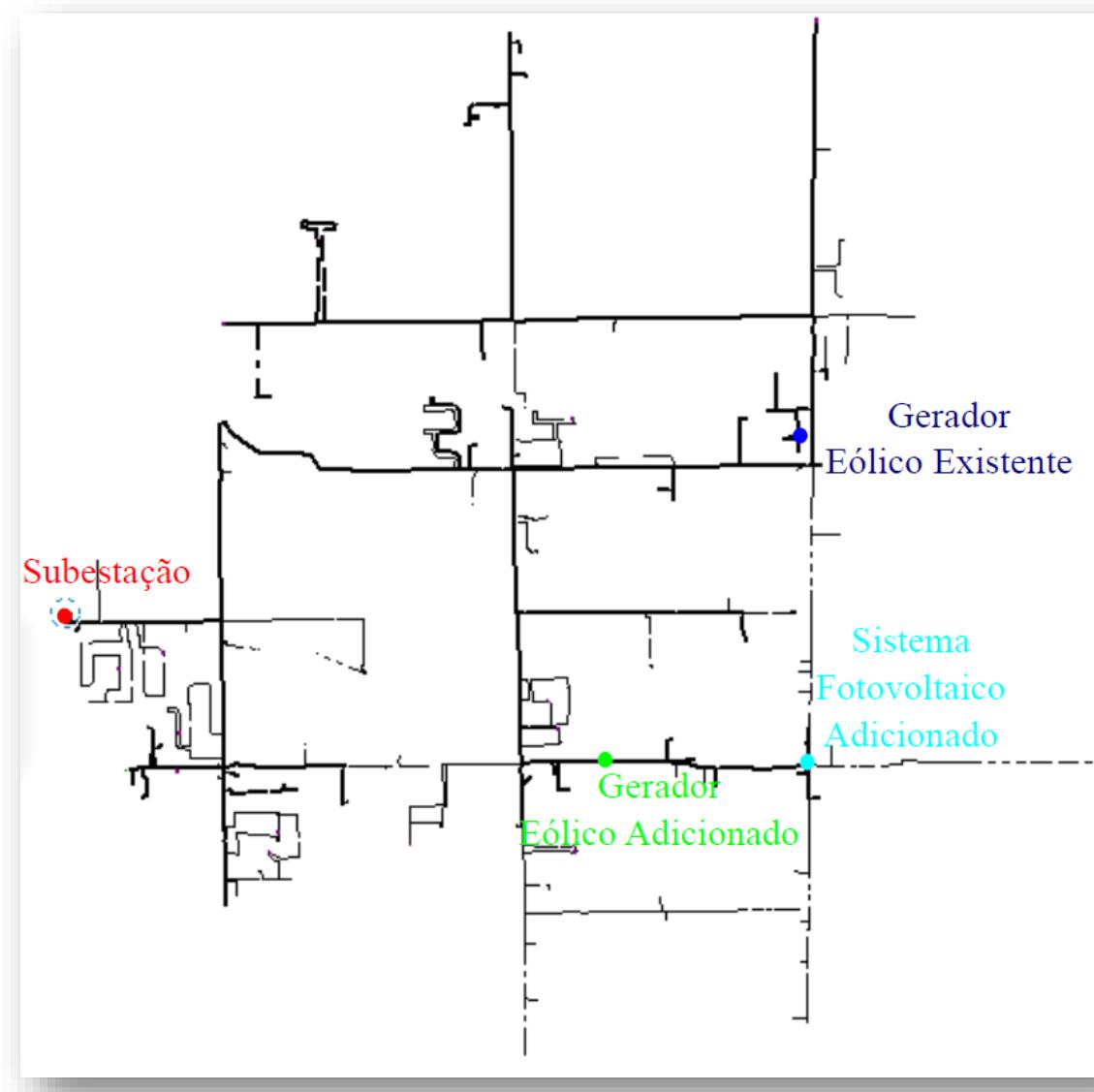
- Subestação com 3 alimentadores

■ Alimentador A

- Sistema eólico existente
- Novo sistema eólico
- Novo sistema fotovoltaico

■ Aumentar o nível de penetração

- Critério de tensão



Informações do Sistema Real

- Alimentador modelado no CYME

Informações do Sistema Real

- Alimentador modelado no CYME
- Equivalente da Alta Tensão



Equivalente	
R_1	0,40 Ω
X_1	3,79 Ω
R_0	1,45 Ω
X_0	6,21 Ω

Informações do Sistema Real

- Alimentador modelado no CYME
- Equivalente da Alta Tensão
- Transformador da subestação e seu LTC

Transformador da Subestação	
V_1	138 kV
V_2	12,47 kV
Tap Primário	131,1 kV
Z	8,17 %
X/R	15,86

Configuração	
Tensão Nominal	120,0 V
Set Point	124,5 V
Band	3 V
Delay	60 s
R	0
X	0

Informações do Sistema Real

- Alimentador modelado no CYME
- Equivalente da Alta Tensão
- Transformador da subestação e seu LTC
- Bancos de Capacitores

Banco A: Configuração

Tensão Nominal	120,0 V
Tensão <i>On</i>	124,0 V
Tensão <i>Off</i>	126,1 V
<i>Delay</i>	5 min

Banco B: Configuração

Tensão Nominal	120,0 V
Tensão <i>On</i>	121,0 V
Tensão <i>Off</i>	123,5 V
<i>Delay</i>	5 min

Informações do Sistema Real

- Alimentador modelado no CYME
- Equivalente da Alta Tensão
- Transformador da subestação e seu LTC
- Bancos de Capacitores
- Sistema eólico existente

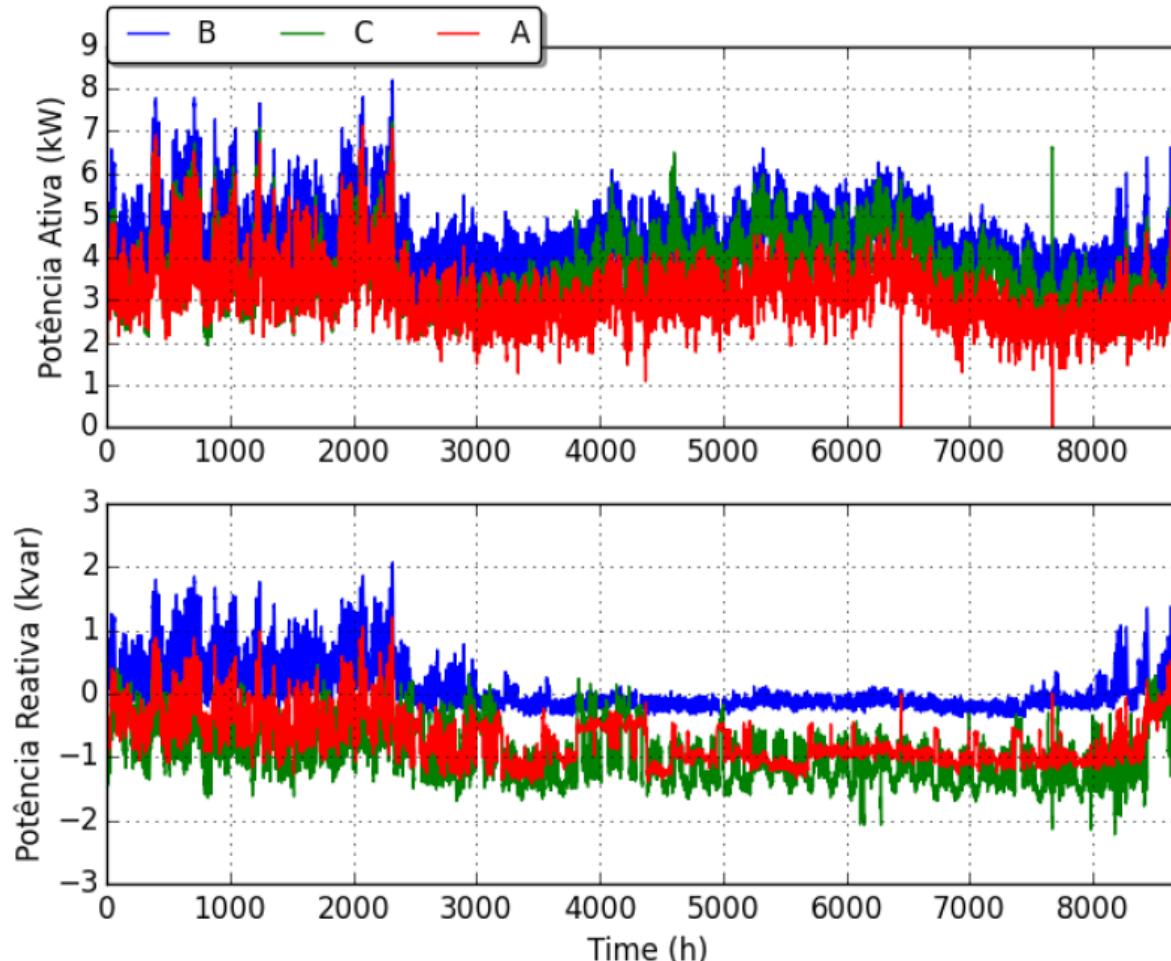


Informações do Sistema Real

- Alimentador modelado no CYME
- Equivalente da Alta Tensão
- Transformador da subestação e seu LTC
- Bancos de Capacitores
- Sistema eólico existente
- Medição na Subestação

Medição na Subestação

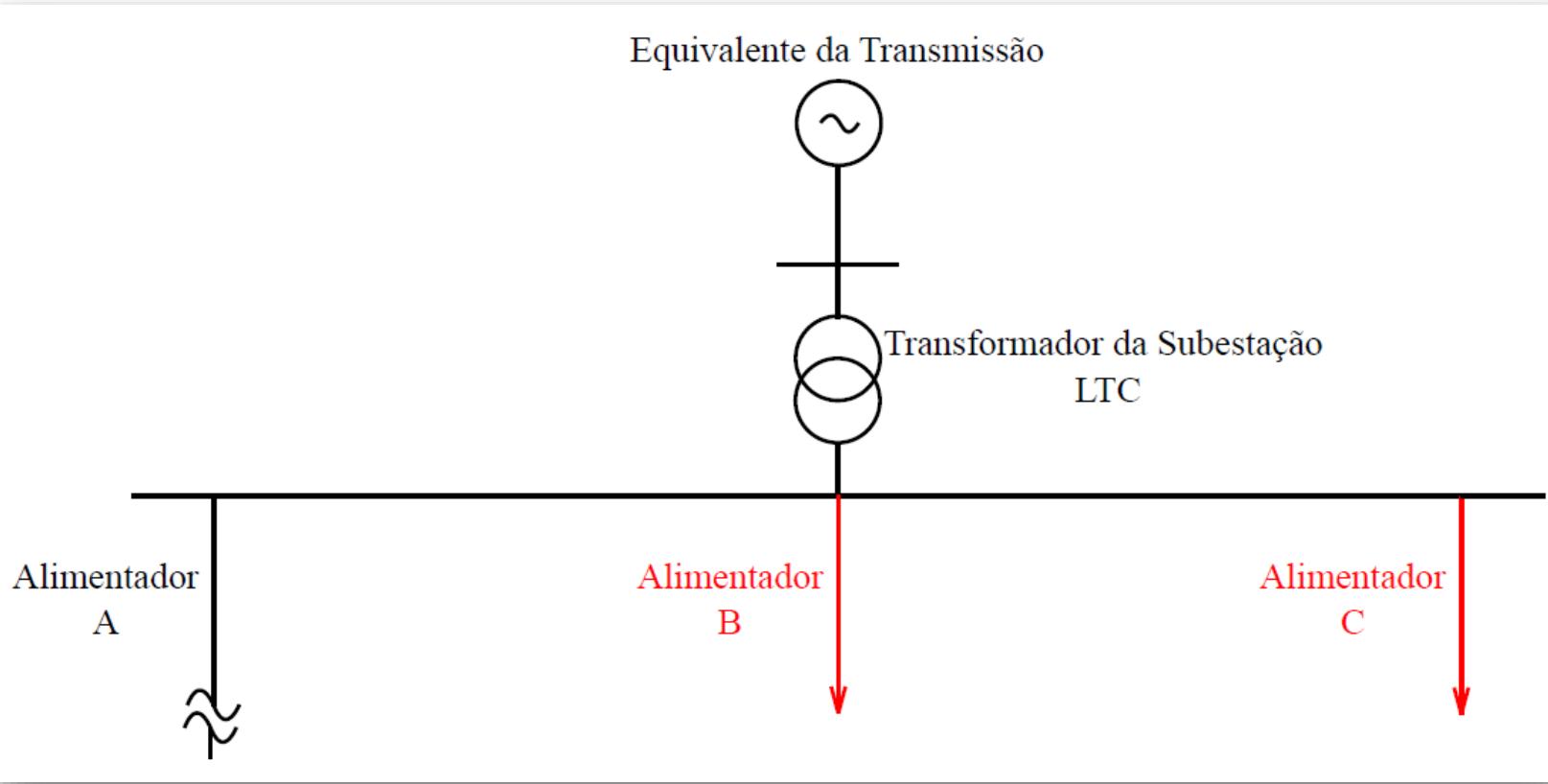
- Medida de potência ativa e reativa no período:
 - 01/06/2014 – 31/05/2015



Modelagem do Sistema no OpenDSS

Alimentadores

- Alimentadores B e C influenciam na operação do LTC.



- Alimentadores B e C: modelados como cargas de potência constante

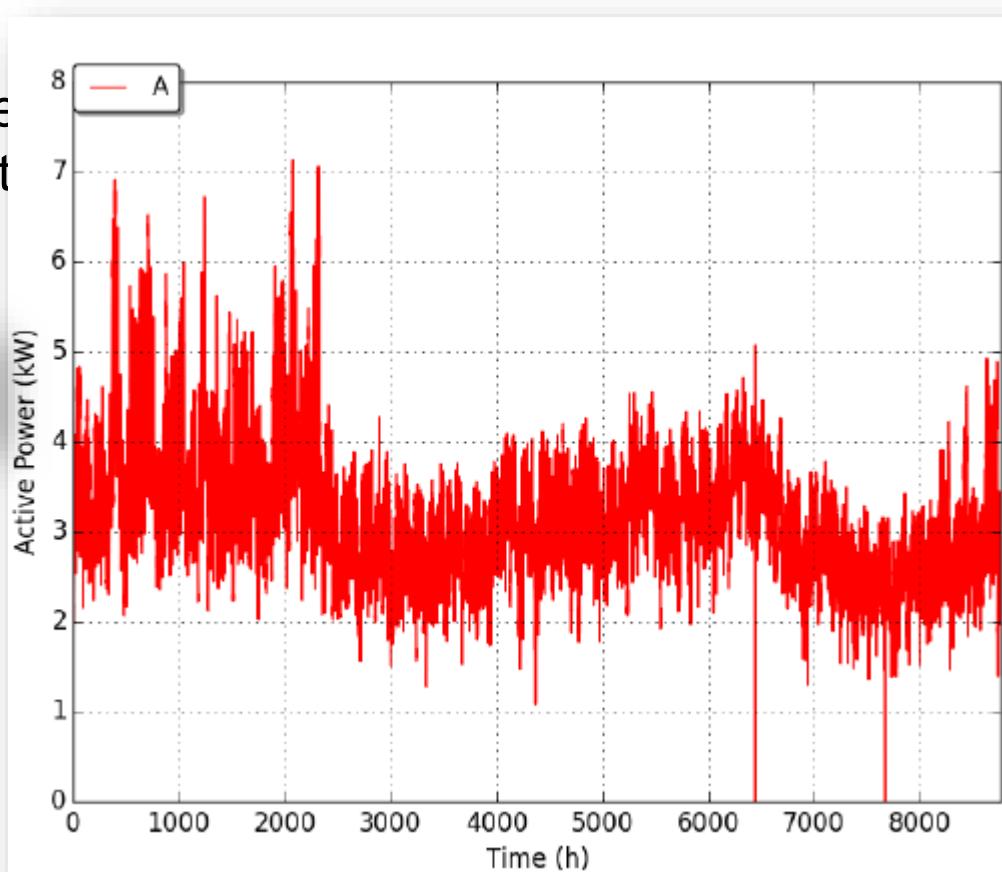
Alimentador A – Consumidores (Cargas)

- Assumindo que todas as cargas apresentam o mesmo comportamento de consumo, ou seja, podem ser associadas a mesma curva de carga
- A presença do “sistema eólico existente” compromete a utilização da medida de potência ativa do alimentador A como curva de carga em (pu) para as cargas
- Sabendo que os alimentadores B e C não apresentam GDs e assumindo que as cargas desses alimentadores se comportam como os consumidores de A

Alimentador A – Consumidores (Cargas)

- Assumindo que todas as cargas apresentam o mesmo comportamento de consumo, ou seja, podem ser associadas a mesma curva de carga
- A presença do “sistema eólico existente” compromete a utilização da medida de potência ativa do alimentador A como curva de carga em (pu) para as cargas
- Sabendo que os alimentadores possuem diferentes curvas de carga, que as cargas desses alimentadores possuem comportamentos diferentes dos consumidores de A

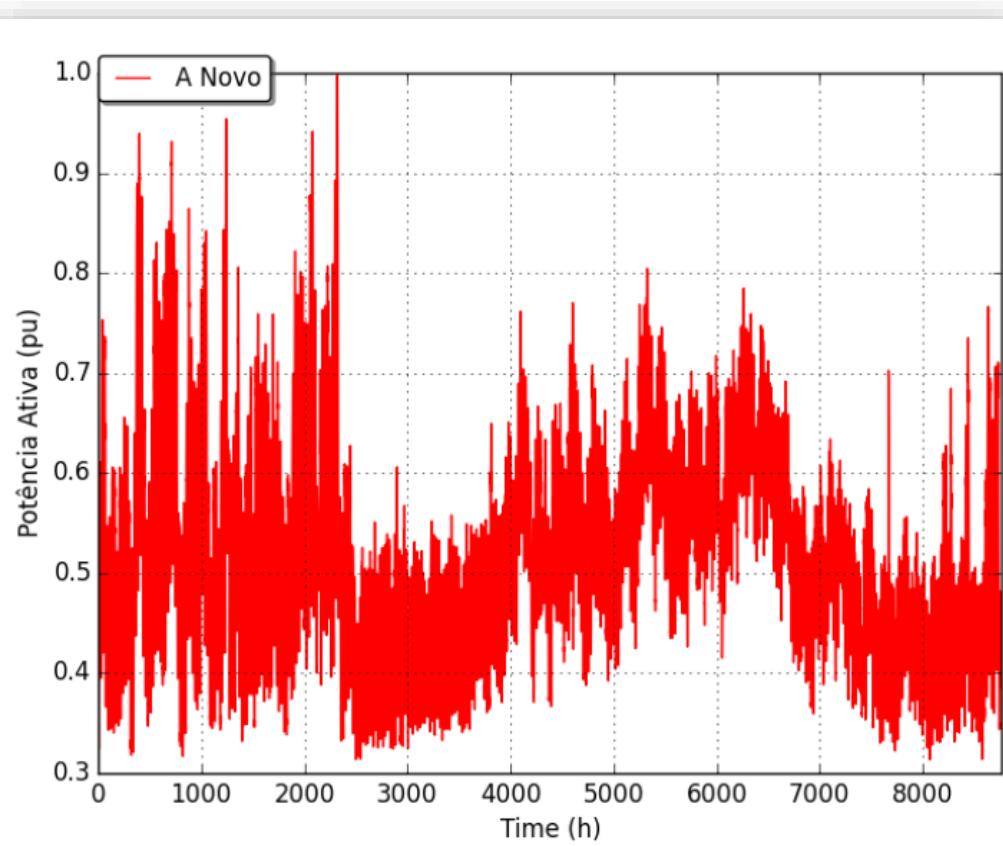
$$P_{Measured} = P_{Consumed} - P_{Wind}$$



Alimentador A – Consumidores (Cargas)

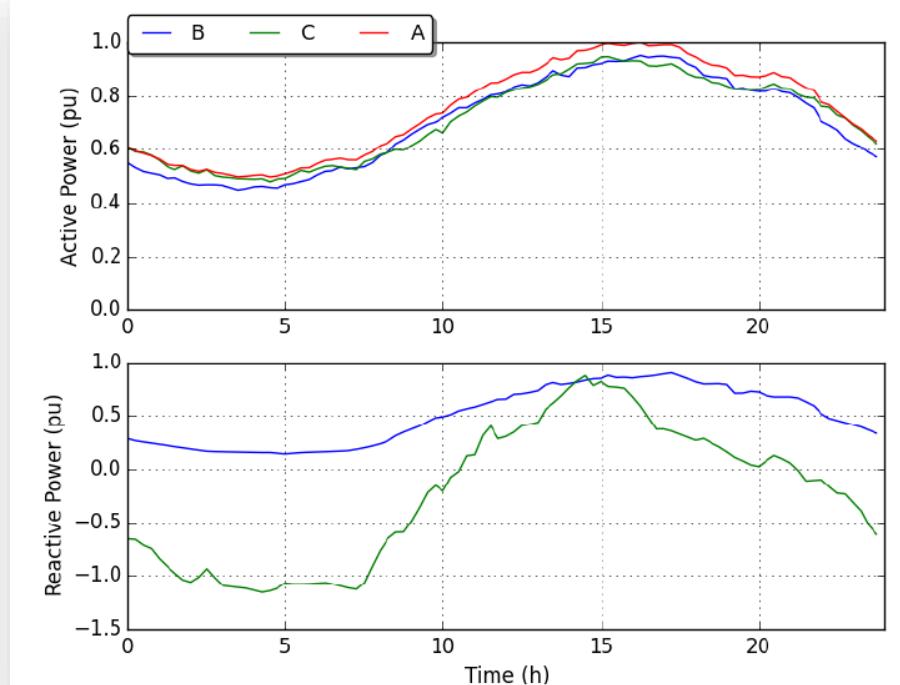
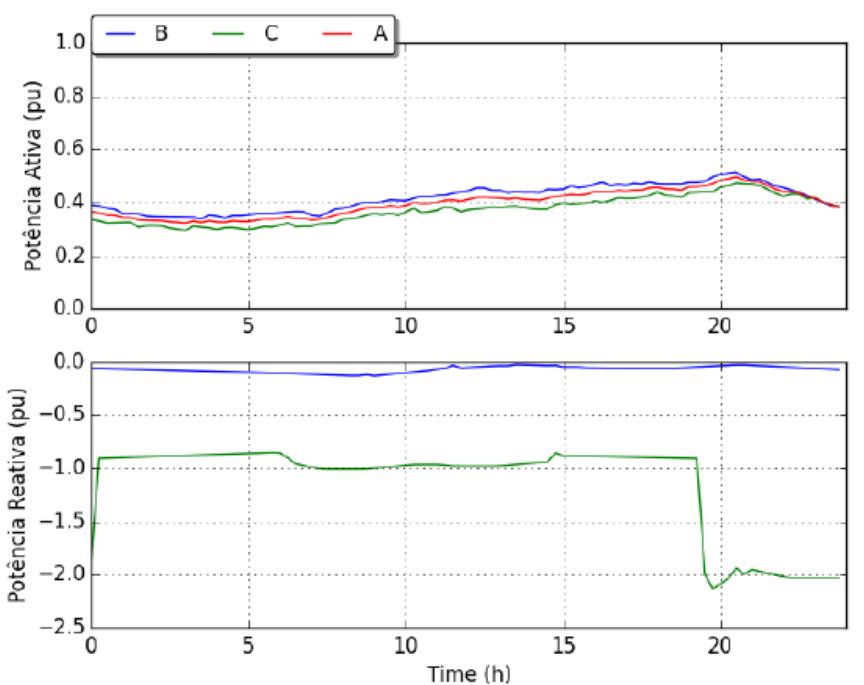
- Assumindo que todas as cargas apresentam o mesmo comportamento de consumo, ou seja, podem ser associadas a mesma curva de carga
- A presença do “sistema eólico existente” compromete a utilização da medida de potência ativa do alimentador A como curva de carga em (pu) para as cargas
- Sabendo que os alimentadores devem ter uma capacidade maior que as cargas desses alimentadores, é necessário considerar os consumidores de A

$$P_A^{Nova} = \frac{P_B + P_C}{P_B^{Instalada} + P_C^{Instalada}}$$



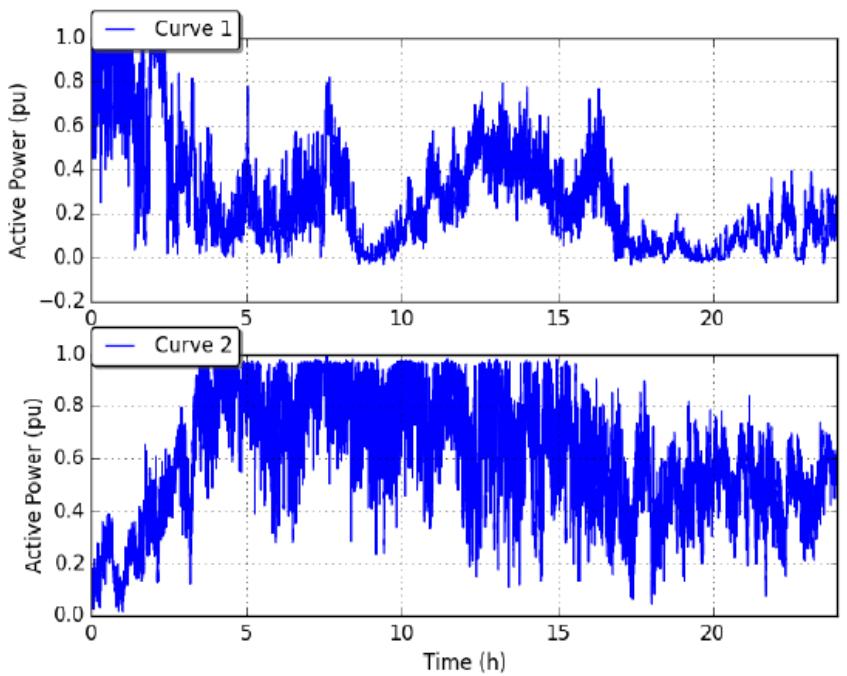
Curvas de Carga

- Dia com menor carregamento:
 - Domingo
 - 19/04/2015
 - 10:30
 - 0,39 pu
- Dia com maior carregamento:
 - Terça-Feira
 - 26/08/2014
 - 16:15
 - 1,00 pu

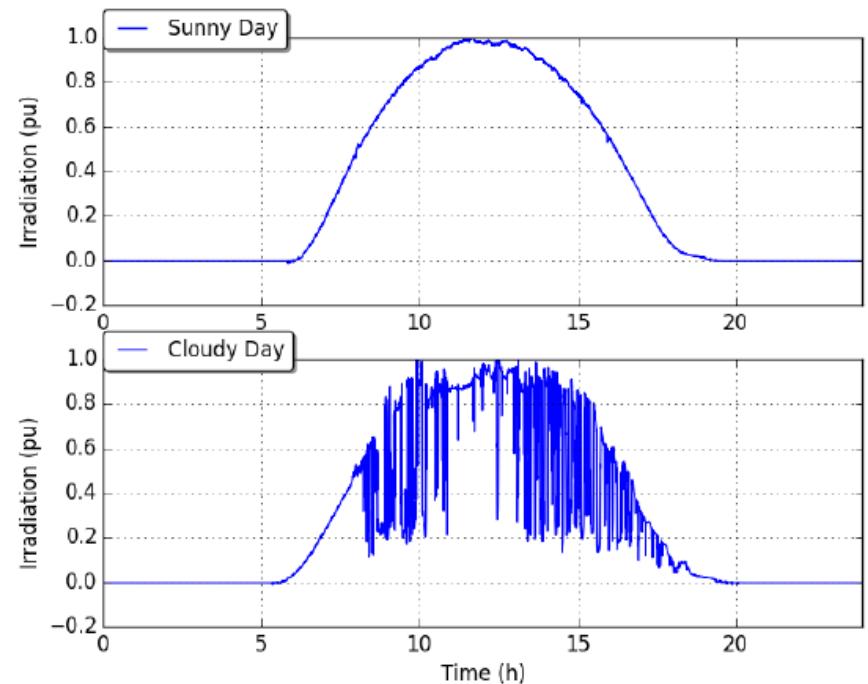


Curvas de Geração

- Sistemas Eólicos:
 - Potência Ativa com $f_p=1$



- Sistema Fotovoltaico:
 - Irradiação



Simulações

SnapShot

■ Baixo Carregamento

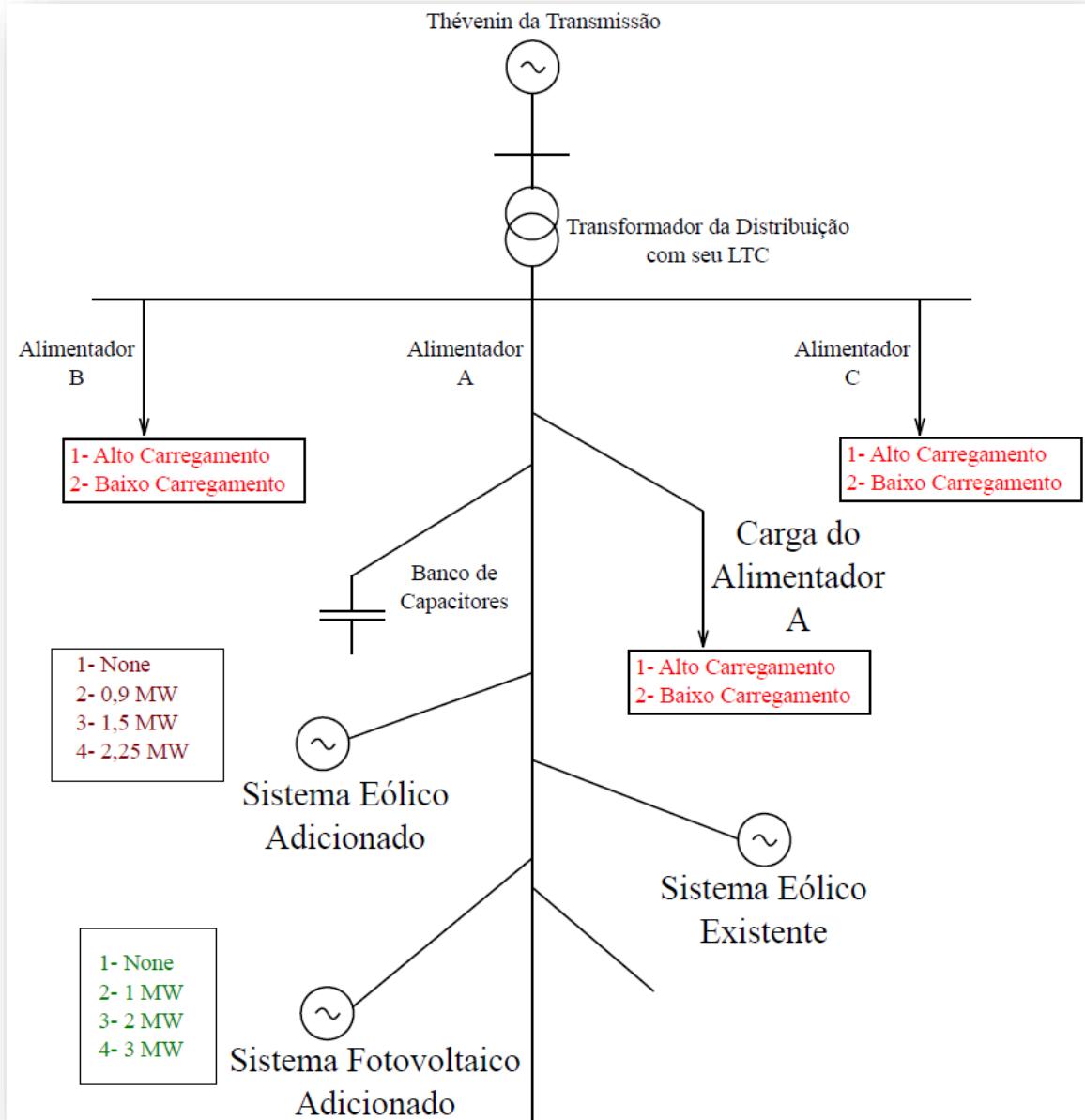
— 0,39 pu

■ Alto Carregamento

— 1,00 pu

■ GDs

— P nominal



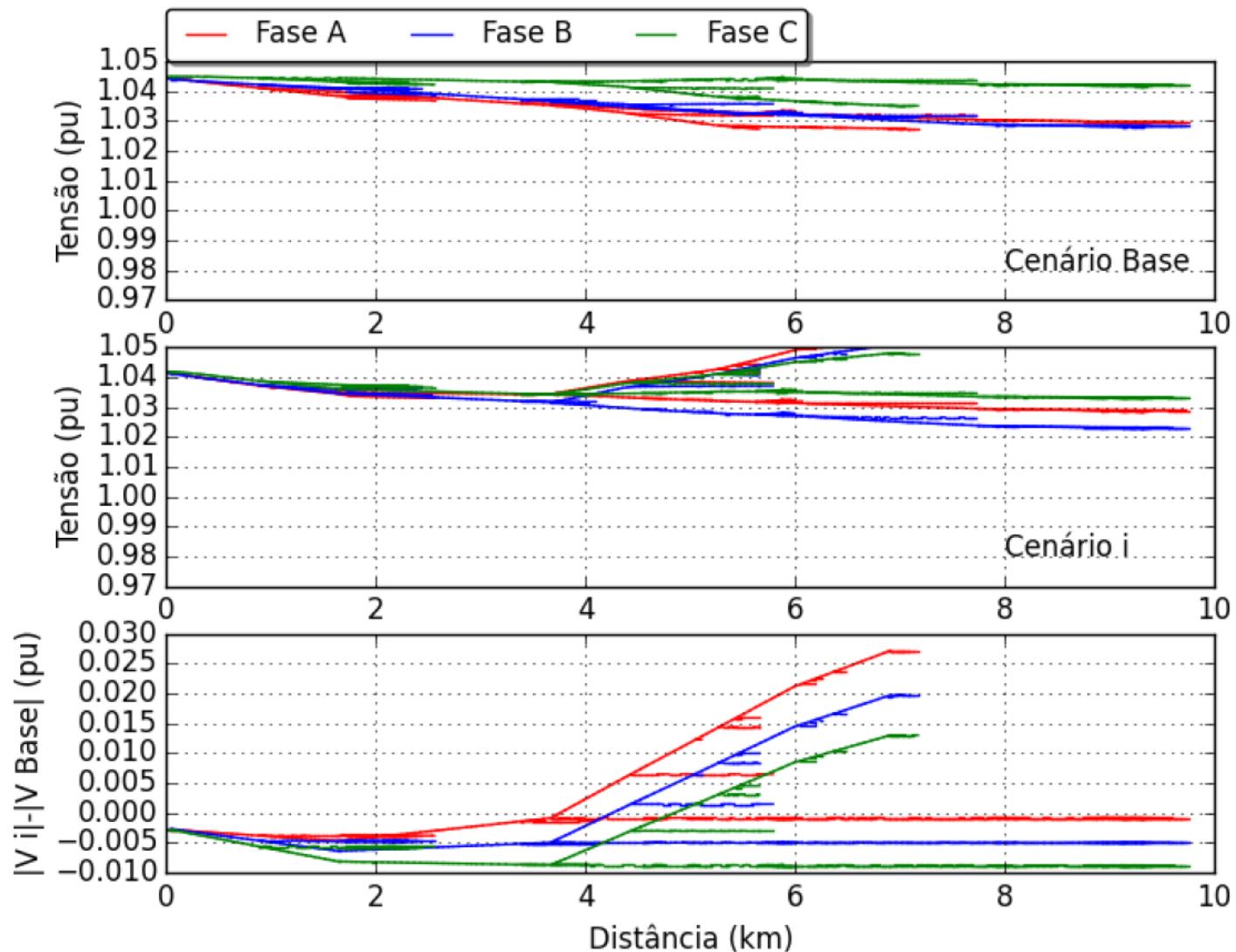
■ Cenários

Critério de Tensão

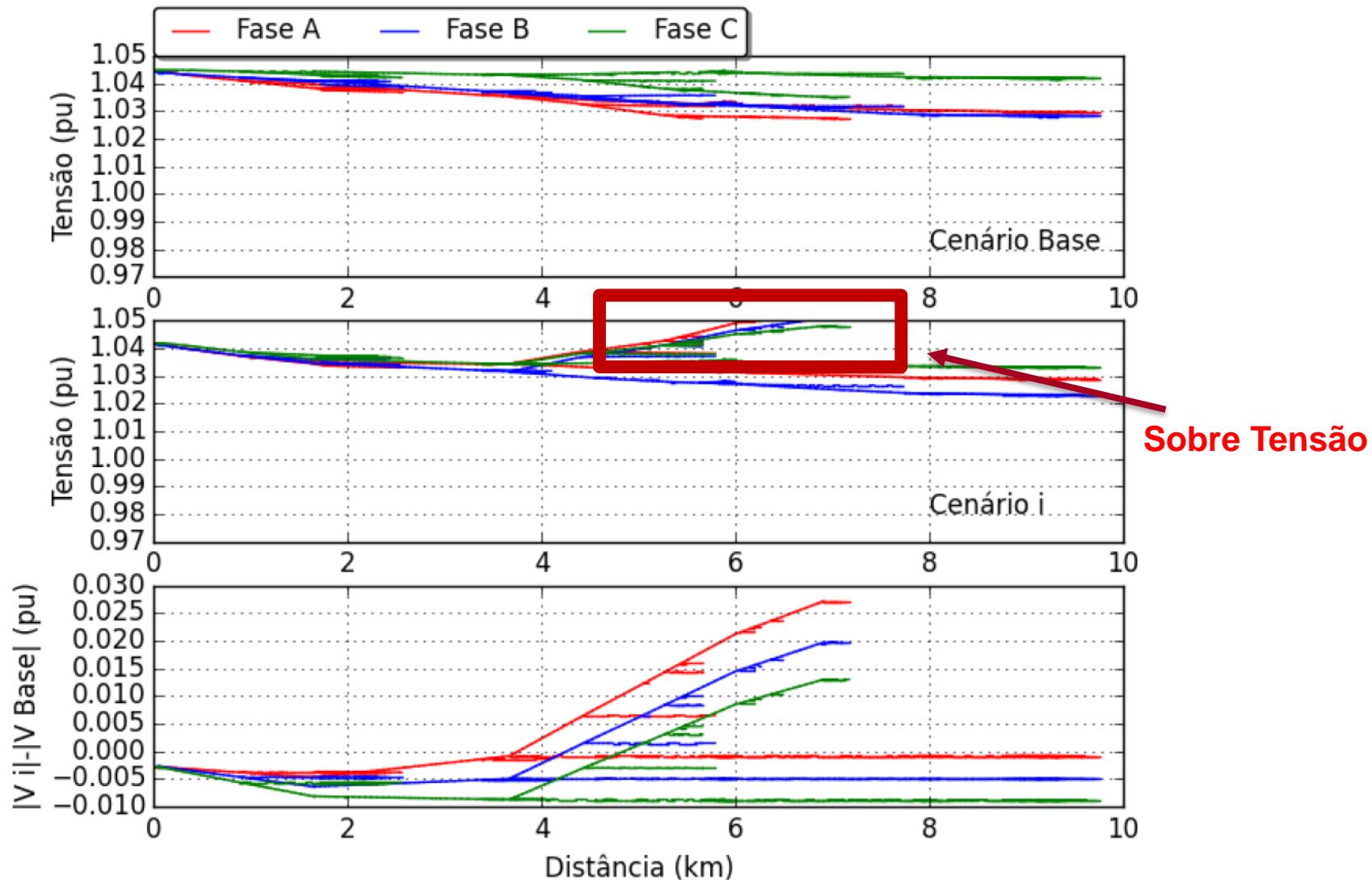
- Baixo Carregamento:
 - Sobretensão.
- Alto carregamento:
 - Sem problemas.

Conexão	MVA Adicionado	
	Eólico	Solar
Base	0,0	0,0
2	0,9	0,0
3	0,0	1,0
4	0,9	1,0
5	1,5	0,0
6	1,5	1,0
7	0,0	2,0
8	0,9	2,0
9	1,5	2,0
10	2,25	0,0
11	2,25	1,0
12	2,25	2,0
13	0,0	3,0
14	0,9	3,0
15	1,5	3,0
16	2,25	3,0

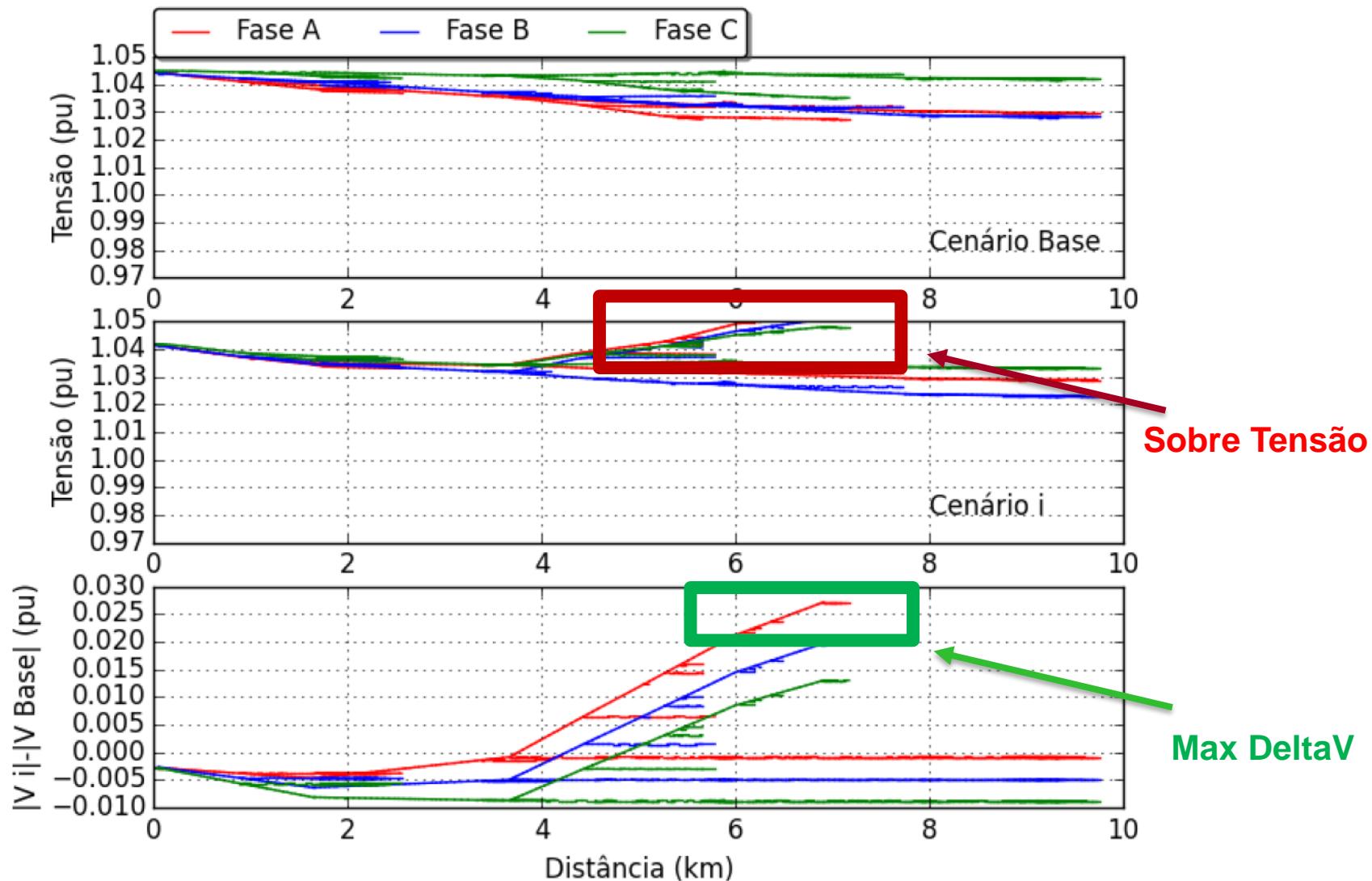
SnapShot



SnapShot



SnapShot



SnapShot

Conexão	MVA Adicionado		Max ΔV pu	Possível Penetração
	Eólico	Solar		
Base	0,0	0,0	-	-
2	0,9	0,0	0,011	✓
3	0,0	1,0	0,015	✓
4	0,9	1,0	0,025	✗
5	1,5	0,0	0,018	✗
6	1,5	1,0	0,032	✗
7	0,0	2,0	0,029	✗
8	0,9	2,0	0,038	✗
9	1,5	2,0	0,044	✗
10	2,25	0,0	0,027	✗
11	2,25	1,0	0,040	✗
12	2,25	2,0	0,052	✗
13	0,0	3,0	0,042	✗
14	0,9	3,0	0,050	✗
15	1,5	3,0	0,056	✗
16	2,25	3,0	0,064	✗

SnapShot

Conexão	MVA Adicionado		Max ΔV pu	Possível Penetração
	Eólico	Solar		
Base	0,0	0,0	-	-
2	0,9	0,0	0,011	✓
3	0,0	1,0	0,015	✓
4	0,9	1,0	0,025	✗
5	1,5	0,0	0,018	✗
6	1,5	1,0	0,032	✗
7	0,0	2,0	0,029	✗
8	0,9	2,0	0,038	✗
9	1,5	2,0	0,044	✗
10	2,25	0,0	0,027	✗
11	2,25	1,0	0,040	✗
12	2,25	2,0	0,052	✗
13	0,0	3,0	0,042	✗
14	0,9	3,0	0,050	✗
15	1,5	3,0	0,056	✗
16	2,25	3,0	0,064	✗

Time-Series (Daily)

- Sistema Eólico – MVA:

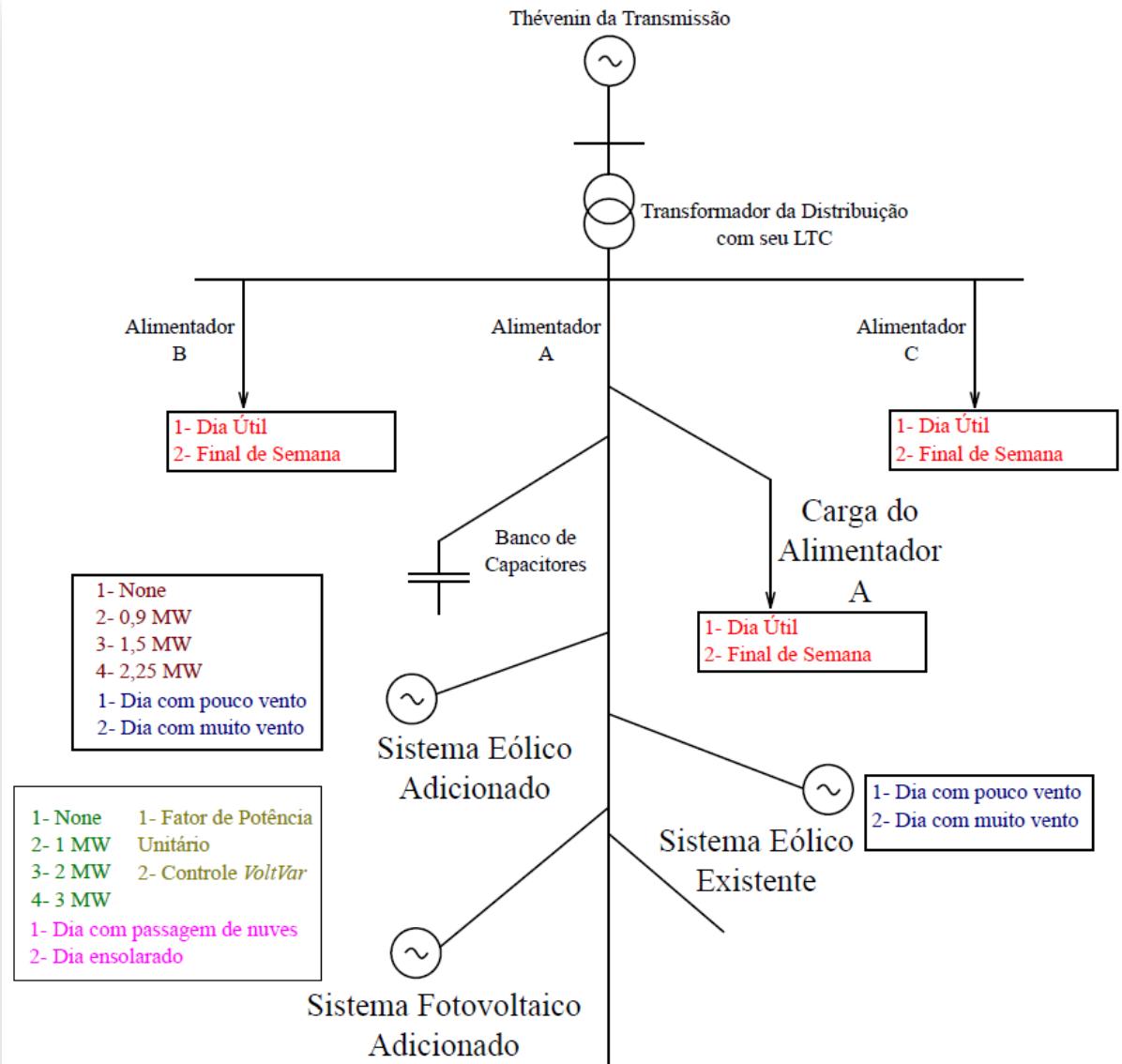
- 0
- 0,9
- 1,5
- 2,25

- Sistema Fotovoltaico – MVA:

- 0
- 1,0
- 2,0
- 3,0

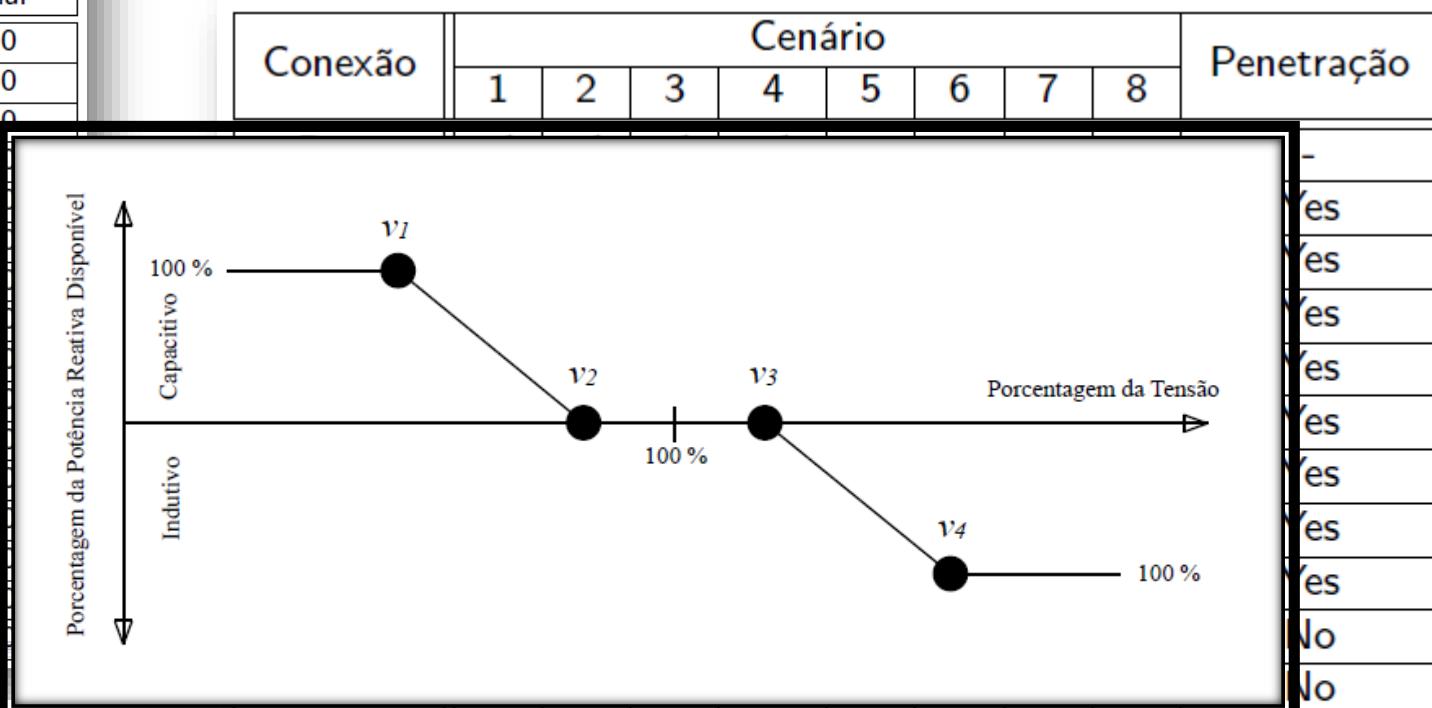
- Curvas:

- Carga – 2 opções
- Eólica – 2 opções
- Solar – 2 opções



Time-Series (Daily)

Conexão	MVA Adicionado	
	Eólico	Solar
Base	0,0	0,0
2	0,9	0,0
3	0,0	1,0
4	0,9	1,0
5	1,5	0,0
6	1,5	1,0
7	0,0	2,0
8	0,9	2,0
9	1,5	2,0
10	2,25	0,0
11	2,25	1,0
12	2,25	2,0
13	0,0	3,0
14	0,9	3,0
15	1,5	3,0
16	2,25	3,0



Cenário	Opções		
	PV	Wind	LoadShape
1	Cloudy	1	High
2	Cloudy	1	Low
3	Cloudy	2	High
4	Cloudy	2	Low
5	Sunny	1	High
6	Sunny	1	Low
7	Sunny	2	High
8	Sunny	2	Low

12	X	X	X	X	X	X	X	X	No
13	✓	+	✓	+	✓	+	✓	+	Yes
14	✓	+	✓	+	✓	+	+	+	Yes
15	X	X	X	X	X	X	X	X	No
16	X	X	X	X	X	X	X	X	No

Resultados

Resultados

- *SnapShot:*

Conexão	Potência MVA	GD
2	0,9	Eólica
3	1,0	Solar

- *Daily:*

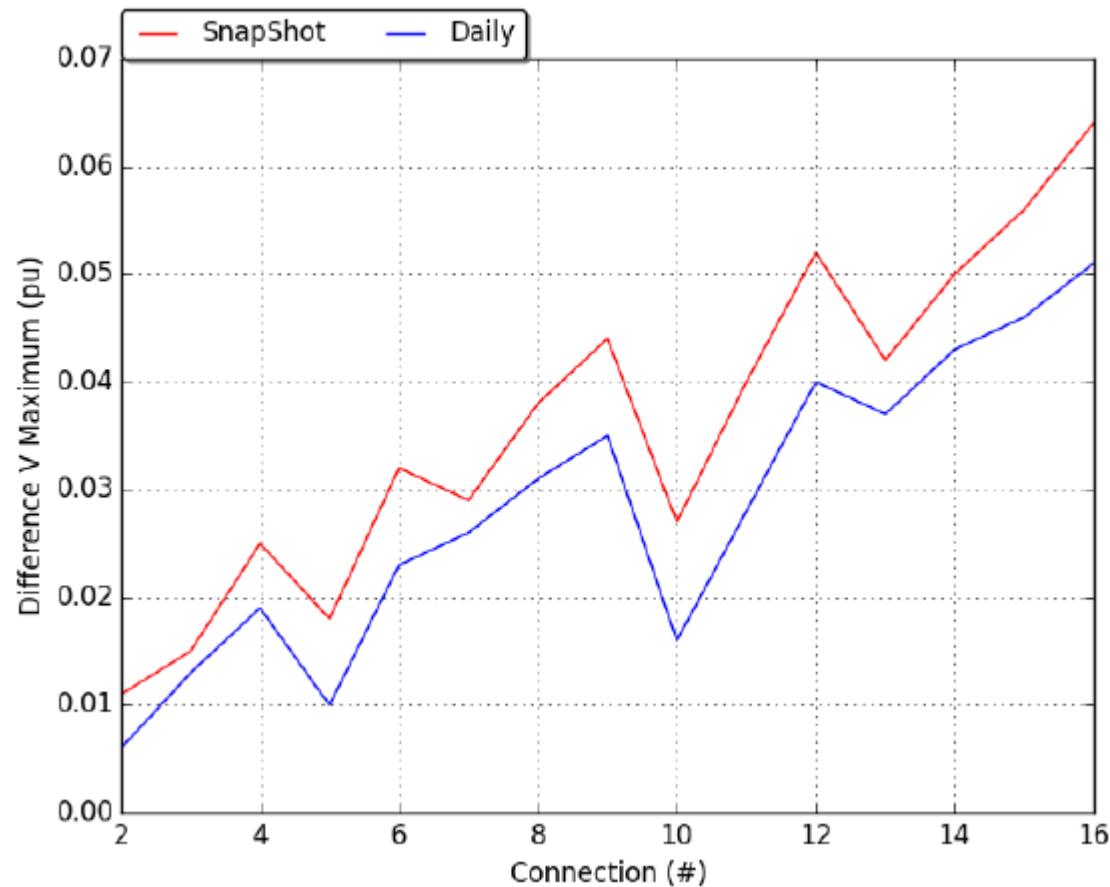
- Sem *VoltVar*:

Conexão	Potência MVA	GD
4	1,9	Ambas
5	1,5	Eólica
7	2,0	Solar

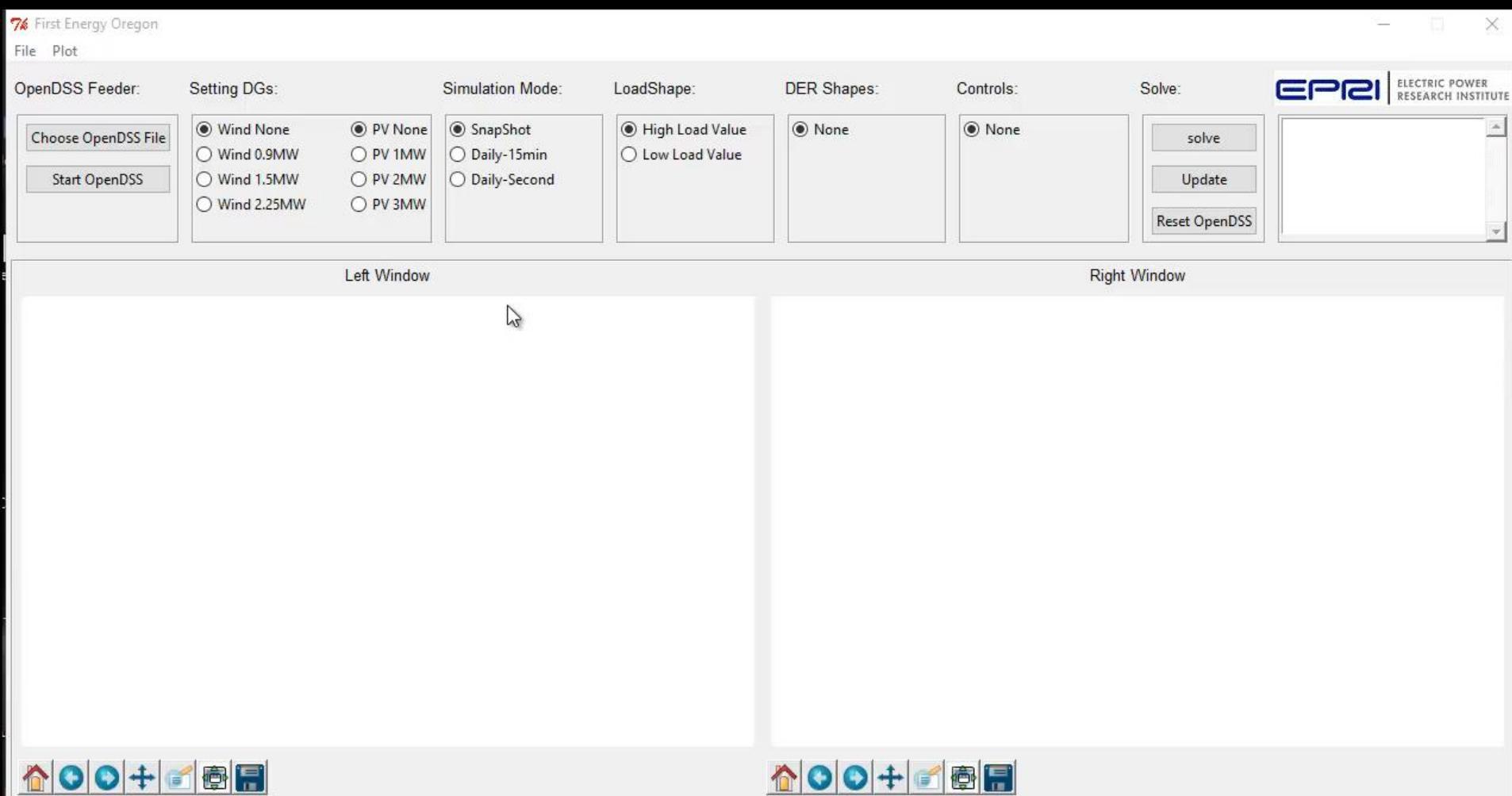
- Com *VoltVar*:

Conexão	Potência MVA	GD
9	3,5	Ambas
13	3,0	Solar
14	3,9	Ambas

Resultados



Aplicação em Python



Publicação

P. Radatz, N. Kagan, C. Rocha, J. Smith and R. C. Dugan, "**Assessing maximum DG penetration levels in a real distribution feeder by using OpenDSS,**" *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, 2016, pp. 71-76.

Comentários Adicionais

Esse material foi disponibilizado gratuitamente, porém, ao utilizá-lo, pedimos que as devidas referências sejam feitas.

Se você possui alguma dúvida ou encontrou algum erro nesse material, por favor, entre em contato conosco através do e-mail opendss.brasil@gmail.com.

**Obrigado!
Dúvidas?**