

5 Avaliação do Solucionador Proposto

5.1 Introdução

A finalidade deste Capítulo é avaliar, através de simulações computacionais, a eficiência e robustez do solucionador proposto no Capítulo 4, composto pelo método iterativo GMRES, pelo pré-condicionador ILU(ξ) com regra baseada no erro e pela estratégia de reordenamento MD.

Consideram-se aqui, para efeitos de avaliação, simulações computacionais envolvendo fluxo de carga e análise de múltiplas contingências. Os sistemas reais de energia elétrica usados para este fim foram: duas configurações do sistema interligado nacional (3.513/2.256 barras e 301/201 geradores) e uma do sistema norte-nordeste (274 barras e 36 geradores) (ONS, 2006). O sistema brasileiro de 3.513 barras possui dois cenários, chamados carga pesada (caso base) e PMC (mais Próximo do Máximo Carregamento). O ponto PMC foi obtido aumentando-se gradativamente o consumo de potência ativa e reativa em todas as barras de carga, mantendo-se o fator de potência constante.

Também são considerados três cenários de carga normal, pesada e crítica do sistema IEEE118-barras. Os dados dos sistemas-teste são apresentados no Apêndice VII. Em todas as simulações considera-se tolerância não-linear (para o algoritmo Newton-Raphson) igual a 10^{-3} , exceto na simulação do item 5.2.5 (desempenho em termos de robustez) onde é considerada tolerância não-linear igual a $8 \cdot 10^{-3}$. Para o sistema brasileiro de 3513 barras, todas as simplificações dos modelos do arquivo de dados foram realizadas mantendo sempre o ponto de operação original fornecido pela ONS. Tanto para o solucionador proposto como também para os outros solucionadores avaliados foram usados os mesmos arquivos de dados e pontos de operação. Durante a avaliação, o desempenho do solucionador proposto é comparado com os desempenhos do solucionador direto MA28, dos programas ANAREDE e ORGANON, e do solucionador iterativo identificado como GMRES+ILUT(τ, ρ)+MD, apresentado no capítulo 3.

Antes de realizada a avaliação, o método de ajuste de parâmetros, apresentado no capítulo anterior, é usado para configurar os parâmetros dos solucionadores iterativos. As simulações foram efetuadas no computador Hewlett Packard Pavilion, processador Intel Centrino de 1.73 GHz, 1 GB de RAM e 2 MB L2 cache. O compilador usado é Compaq Visual Fortran Professional Edition 6.1.0.

5.2

Avaliação do Desempenho do Solucionador no Problema de Fluxo de Carga

Nesta seção, o objetivo é avaliar o desempenho computacional do solucionador no problema de fluxo de carga e realizar as comparações com outros solucionadores em termos de eficiência computacional. Antes de realizadas as comparações, são encontradas as faixas ou valores para os parâmetros, onde os solucionadores alcançam seu maior desempenho, isto é, faixas onde os solucionadores garantem a convergência com a maior eficiência computacional possível.

O ajuste dos parâmetros é realizado para o solucionador proposto GMRES+ILU(ξ)+MD e do solucionador GMRES+ILUT(τ, ρ)+MD. Valores apropriados para os parâmetros dos solucionadores são encontrados para quatro sistemas-teste, sendo estes: o sistema norte-nordeste de 274 barras, a configuração do sistema brasileiro de 2.256 barras e uma configuração do sistema brasileiro de 3.513 barras para dois cenários de carga pesada e PMC. Todos os passos são realizados para cada sistema elétrico.

5.2.1

Ajuste dos Parâmetros do Solucionador Proposto

- **Estabelecimento do Espaço de Busca**

O espaço de busca é definido pelos domínios de cada parâmetro do solucionador, apresentados na Tabela 4.4, onde se mostra também o número máximo de valores por parâmetro. O critério usado para definir o universo de valores dos parâmetros é baseado na experiência adquirida ao longo deste trabalho.

A principal restrição para definir os valores máximos das tolerâncias do GMRES é que devem ser sempre menores que a tolerância usada no teste de convergência do algoritmo Newton-Raphson (10^{-3}). Tolerâncias maiores causam casos não convergentes. Para estes experimentos são escolhidos valores maiores (10^{-2}) intencionalmente para provar que estes geram casos não convergentes. Para definir os valores mínimos, é escolhido intencionalmente 10^{-10} para provar que valores pequenos sempre estão associados com excessivos números de operações. No caso do pré-condicionador, tenta-se abranger intencionalmente até valores extremos, para os quais se sabe que o solucionador realiza excessivos números de operações. Por exemplo, para o parâmetro ξ do pré-condicionador ILU(ξ) é considerado o valor zero, associado com o preenchimento total dos fatores triangulares L e U.

O número máximo de valores por parâmetro é definido criteriosamente com o intuito de realizar um número suficiente de experimentos, assim como para poder diferenciar as regiões de desempenho e facilitar a delimitação das faixas de valores recomendáveis para os parâmetros. Os valores recomendados são apresentados na última coluna da Tabela 4.4.

Tabela 5.1 – Domínios dos parâmetros usados nos solucionadores

Parâmetros	Máximo	Mínimo	Número máximo de valores
atol	10^{-2}	10^{-10}	80
rtol	10^{-2}	10^{-10}	80
ξ	10^{-2}	0	335

Para os valores especificados na Tabela 4.4, existem 6.400 (80×80) combinações possíveis entre a tolerância absoluta e relativa (atol,rtol) e 335 valores possíveis para ξ . Portanto, o espaço de busca é definido por 2.144.000 ($80 \times 80 \times 335$) combinações totais entre todos os parâmetros do solucionador, para cada sistema elétrico.

- **Experimentos Numéricos**

Seguindo as recomendações mencionadas no capítulo 4, para cada combinação das tolerâncias absoluta e relativa (atol,rtol) são simulados 335 Fluxos de Carga,

registrando-se o número de operações de ponto flutuante mínimo (MFLOPS) para cada valor do parâmetro ξ do pré-condicionador. Portanto, para cada combinação (atol,rtol) é gerado um gráfico de eficiência computacional (em MFLOPS) em função de ξ , e é registrado o número de operações de ponto flutuante mínimo (MFLOPS_{min}). Depois de realizados todos os experimentos, são registrados 6.400 (80x80) números de operações de ponto flutuante mínimos (MFLOPS_{min}) associados às combinações (atol,rtol). A partir destas informações são gerados os gráficos de alta eficiência, um por cada sistema elétrico, como apresentado na Figura 5.1. Cada gráfico apresenta em escala de cores, todos MFLOPS_{min} em função de suas correspondentes combinações (atol,rtol).

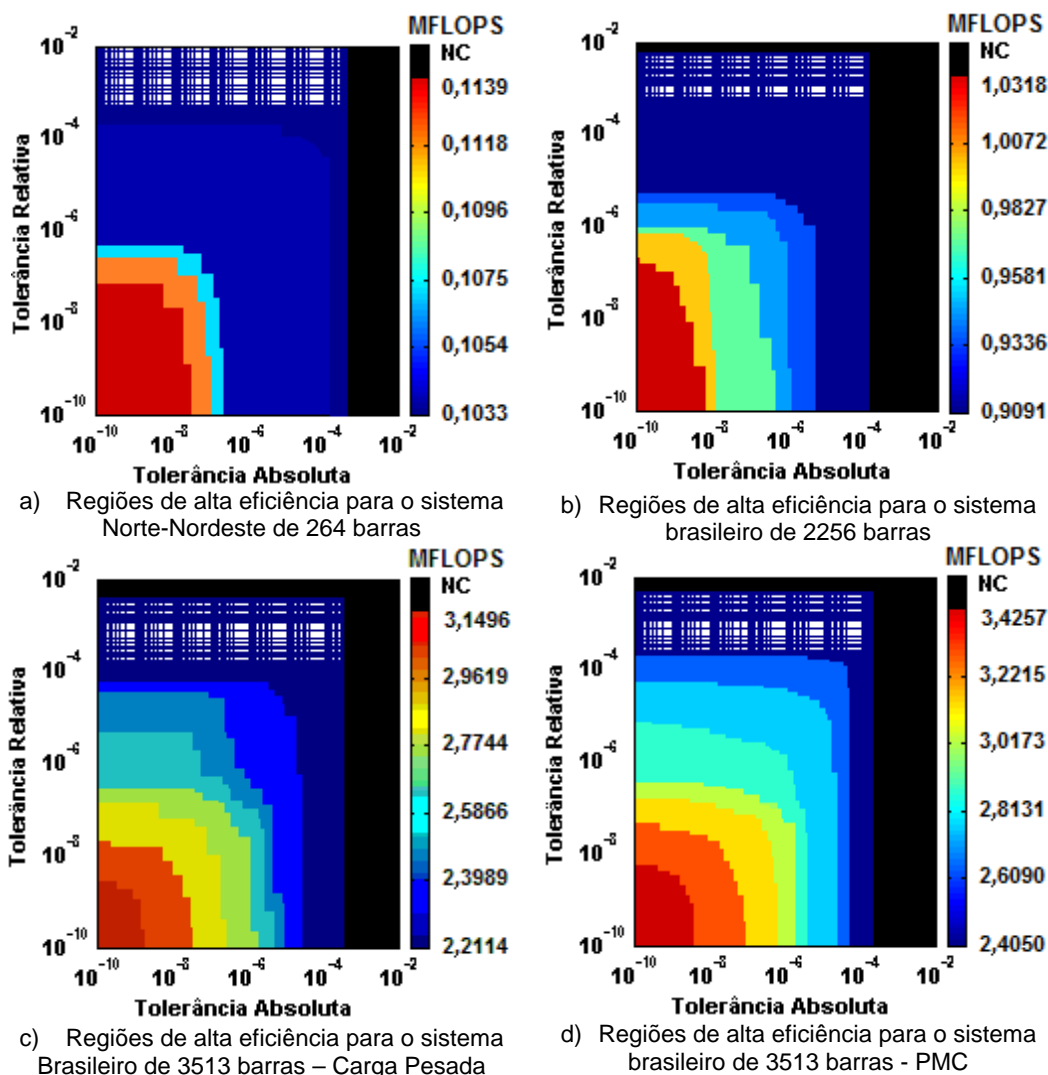


Figura 5.1 – Gráficos de alta eficiência em função das tolerâncias do GMRES para o solucionador proposto.

A região azul corresponde às simulações que resultaram no menor número de operações de ponto flutuante. Já as regiões vermelhas correspondem às simulações que resultaram nos maiores números de operações de ponto

flutuante. As barras ao lado dos gráficos fornecem informações sobre a evolução do número de operações à medida que os parâmetros se afastam das regiões vermelhas em direção às azuis, ou seja, as de melhor desempenho. Já as regiões em negrito correspondem aos casos não convergentes (NC). Observa-se que entre todos os valores registrados para $\text{MFLOPS}_{\text{mín}}$, a região que contém os casos com os menores possíveis está em azul escuro e preenchida de pontos brancos. Este valor é chamado de número mínimo de operações possível ($\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$) e é apresentado na Tabela 5.2 para cada sistema elétrico.

Observa-se que em todos os gráficos de alta eficiência, as regiões de não-convergência estão totalmente definidas e não se misturam com as regiões de convergência, isto é, não existem regiões de não-convergência ilhadas dentro de regiões de convergência. Conforme mencionado, as regiões não convergentes (NC) estão associadas a valores de tolerância absoluta e relativa, próximos ou maiores que a tolerância usada no algoritmo Newton-Raphson (10^{-3}).

Observa-se também que para qualquer valor de tolerância absoluta, dentro da região de convergência, sempre é possível realizar o número mínimo de operações possível ($\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$). Porém, a tolerância relativa restringe seus valores a uma faixa específica para cada sistema elétrico. Também é importante mencionar que tanto a diminuição das tonalidades (para cada cor), assim como a seqüência lógico-cromática (azul, verde, amarelo e vermelho) é correta e esperada, conforme as tolerâncias também se tornem menores, isto é, conforme a tolerância se torna mais exigente (no teste de convergência), o número de operações deve aumentar. Esta característica facilita a determinação das faixas recomendáveis e é sinal do funcionamento correto do solucionador proposto.

Tabela 5.2 – Menor número de operações possíveis realizadas pelo solucionador proposto

Sistema	Número Mínimo de Operações Possíveis - $\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$	Maior número de operações (maior $\text{MFLOPS}_{\text{mín}}$)
Norte-Nordeste	0,1033	0,1139
Brasil 2.256	0,9091	1,0318
Brasil 3.515 Carga Pesada	2,2114	3,1496
Brasil 3.515 - PMC	2,4050	3,4257

- **Delimitação das Tolerâncias do GMRES**

Em cada um dos gráficos de alta eficiência apresentados na Figura 5.1, é segmentada a região dos $\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$. Esta região é de cor azul e se diferencia do resto pelos pontos brancos, cada um associado a uma combinação $(\text{atol}, \text{rtol})$ que apresenta o menor número de operações possível ($\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$) em todo o espaço de busca. A partir destes gráficos são encontradas as faixas de valores – $(\text{atol}_{\text{mín}}, \text{atol}_{\text{máx}})$ e $(\text{rtol}_{\text{mín}}, \text{rtol}_{\text{máx}})$ – recomendáveis para as tolerâncias do método GMRES associadas ao melhor desempenho possível, apresentadas na Tabela 5.3 para os quatro sistemas elétricos.

Tabela 5.3 – Faixas de valores recomendáveis para as tolerâncias do método GMRES

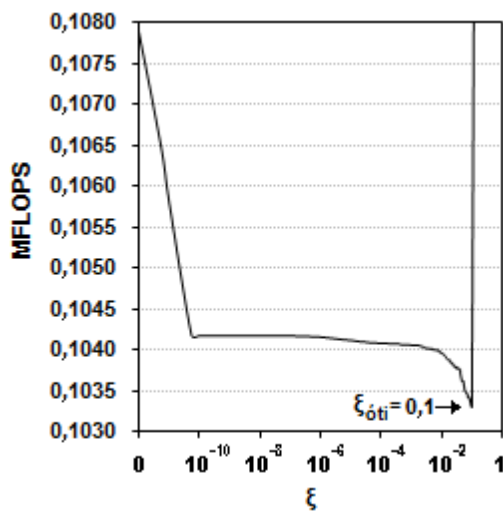
Sistema	Tolerância Absoluta ($\text{atol}_{\text{mín}}, \text{atol}_{\text{máx}}$)	Tolerância Relativa ($\text{rtol}_{\text{mín}}, \text{rtol}_{\text{máx}}$)
Norte-Nordeste	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 1,8 \cdot 10^{-4})$	$(5,3 \cdot 10^{-4}; 1,0 \cdot 10^{-2})$
Brasil 2256	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 1,1 \cdot 10^{-4})$	$(7,9 \cdot 10^{-4}; 5,8 \cdot 10^{-3})$
Brasil 3515 Carga Pesada	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 1,5 \cdot 10^{-4})$	$(1,8 \cdot 10^{-4}; 4,1 \cdot 10^{-3})$
Brasil 3515 Carga Crítica	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 1,3 \cdot 10^{-4})$	$(1,9 \cdot 10^{-4}; 5,5 \cdot 10^{-3})$
Interseção	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 1,1 \cdot 10^{-4})$	$(7,9 \cdot 10^{-4}; 4,1 \cdot 10^{-3})$

Na última linha da Tabela 5.3 apresenta-se a interseção de todas as faixas. Qualquer valor da interseção das faixas pode ser usado no solucionador, garantindo a convergência em um número mínimo de operações de ponto flutuante para os quatro sistemas elétricos considerados.

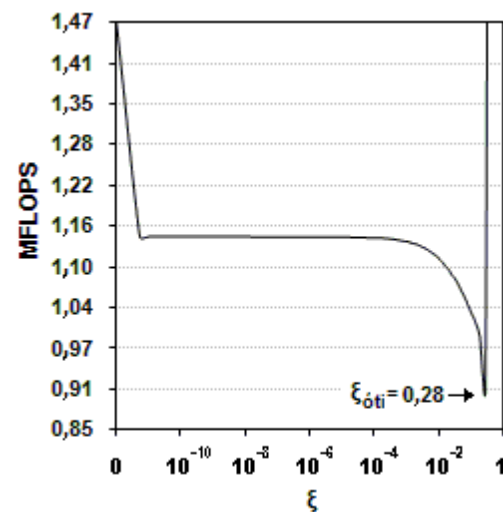
- **Delimitação dos Parâmetros do Pré-condicionador**

Neste último passo, a partir das faixas $(1,0 \cdot 10^{-10}; 1,1 \cdot 10^{-4})$ para a tolerância absoluta e $(7,9 \cdot 10^{-4}; 4,1 \cdot 10^{-3})$ para a tolerância relativa do GMRES, é escolhido um valor para cada uma, ou seja, $\text{atol}_{\text{óti}} = 1,0 \cdot 10^{-5}$ e $\text{rtol}_{\text{óti}} = 2,8 \cdot 10^{-3}$, e já que todas as tolerâncias dessas faixas têm o mesmo $\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$, pode-se escolher qualquer valor. Estes valores são usados para delimitar os parâmetros do pré-condicionador, nos quatro sistemas elétricos.

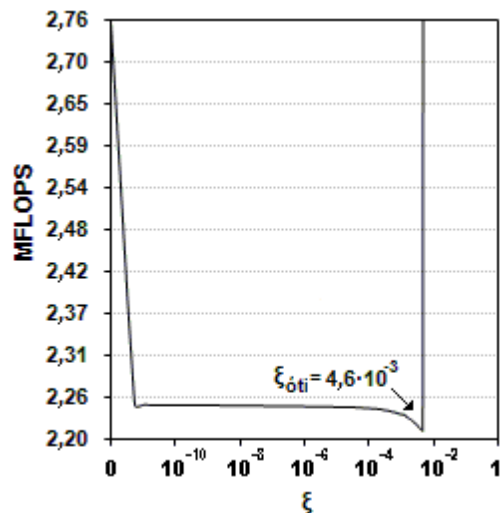
Nos gráficos de eficiência da Figura 5.2, associados aos valores escolhidos para as tolerâncias ($\text{atol}_{\text{óti}}$; $\text{rtol}_{\text{óti}}$), deve-se identificar as regiões de melhor desempenho do solucionador em função do parâmetro ξ do pré-condicionador, para cada sistema elétrico. Observa-se que não é possível obter faixas ($\xi_{\text{mín}}$; $\xi_{\text{máx}}$) de valores recomendáveis para o parâmetro do pré-condicionador, pois existe apenas um único (ou alguns poucos) valor de ξ associado ao melhor desempenho possível $\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$. Este valor é chamado de $\xi_{\text{óti}}$ e é apresentado na Tabela 5.4, para cada um dos sistemas elétricos avaliados.



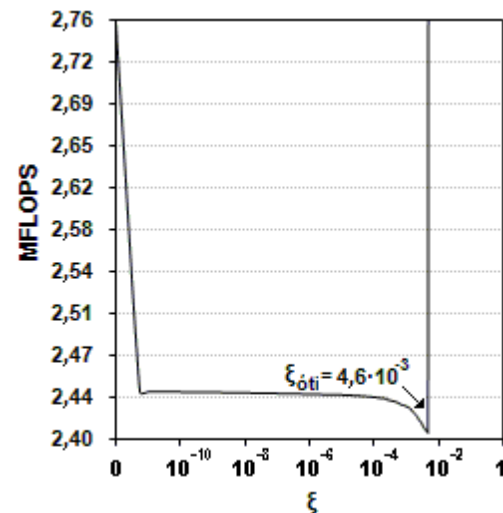
a) Regiões de eficiência para o sistema Norte-Nordeste de 264 barras



b) Regiões de eficiência para o sistema brasileiro de 2256 barras



c) Regiões de eficiência para o sistema Brasileiro de 3513 barras – Carga Pesada



d) Regiões de eficiência para o sistema brasileiro de 3513 barras - PMC

Figura 5.2 – Gráficos de eficiência em função do parâmetro ξ do pré-condicionador ILU(ξ).

Observa-se em todos os gráficos que o desempenho melhora significativamente para valores de ξ menores que 10^{-10} , já que existem muitos elementos

eliminados com erro associado menor que 10^{-10} . Valores de ξ entre 10^{-10} e 10^{-4} normalmente não melhoram o desempenho do solucionador e valores maiores do que os especificados na Tabela 5.4 aumentam subitamente o número de operações de ponto flutuante. O número de operações associado com ξ igual a zero corresponde ao desempenho do solucionador quando todos os elementos dos fatores triangulares são preenchidos.

Tabela 5.4 – Valores recomendáveis para o parâmetro ξ

Sistema	Valor ótimo $\xi_{\text{óti}}$
Norte-Nordeste	0,28
Brasil 2.256	0,1
Brasil 3.515 Carga Pesada	$4,6 \cdot 10^{-3}$
Brasil 3.515 Carga Crítica	$4,6 \cdot 10^{-3}$

O número total de simulações de fluxo de carga necessárias para obter os valores recomendáveis para os parâmetros é equivalente ao número de combinações, isto é, 2.144.000 para cada sistema elétrico.

5.2.2

Ajuste dos parâmetros do solucionador GMRES+ ILUT(τ,ρ)+MD

- **Estabelecimento do Espaço de Busca**

O espaço de busca é definido pelos domínios de cada parâmetro deste solucionador, apresentados na Tabela 5.5, onde se mostra também o número total de valores por parâmetro. Para estabelecer o espaço de busca, tanto das tolerâncias do GMRES como dos parâmetros do pré-condicionador, são seguidos os mesmos critérios apresentados na seção anterior.

O número total de valores por parâmetro é definido criteriosamente tanto com o intuito de realizar o número de experimentos suficiente como para poder diferenciar as regiões de desempenho e facilitar a delimitação das faixas de valores recomendáveis para os parâmetros. Os valores recomendados são apresentados na última coluna da Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Domínios dos parâmetros usados nos solucionadores

Parâmetros	Máximo	Mínimo	Número total de valores
atol	10^{-2}	10^{-10}	80
rtol	10^{-2}	10^{-10}	80
τ	10^{-4}	10^{-12}	251
ρ	0	150	150

Para os valores especificados na Tabela 5.5, existem 6.400 (80x80) combinações possíveis entre a tolerância absoluta e relativa (atol,rtol) e 37.650 (251x150) combinações possíveis entre τ e ρ . Portanto, o espaço de busca (número de simulações de fluxo de carga) é definido por 240.960.000 (80x80x251x150) combinações entre todos os parâmetros do solucionador, para cada sistema elétrico. Observa-se que o esforço computacional para realizar todos os experimentos neste solucionador é alto, pois requer várias simulações de fluxo de carga, muito mais que as 2.144.000 realizadas quando o ajuste de parâmetros é aplicado para o solucionador proposto, na seção anterior.

- **Experimentos Numéricos**

Seguindo as recomendações mencionadas, para cada combinação das tolerâncias absoluta e relativa (atol,rtol), são simulados 37.650 (251x150) fluxos de carga, registrando-se o número de operações de ponto flutuante mínimo (MFLOPS) para cada combinação dos parâmetros τ e ρ do pré-condicionador. Portanto para cada combinação (atol,rtol) é gerado um gráfico de eficiência computacional (em MFLOPS) em função de τ e ρ , e é registrado o número de operações de ponto flutuante mínimo (MFLOPS_{min}).

Depois de realizados todos os experimentos, são registrados 6.400 (80x80) números de operações de ponto flutuante mínimos MFLOPS_{min} associados às combinações (atol,rtol). A partir destas informações, são gerados os gráficos de alta eficiência para cada sistema elétrico, como apresentado na Figura 5.3. Cada gráfico apresenta em escala de cores MFLOPS_{min} em função de suas correspondentes combinações (atol,rtol).

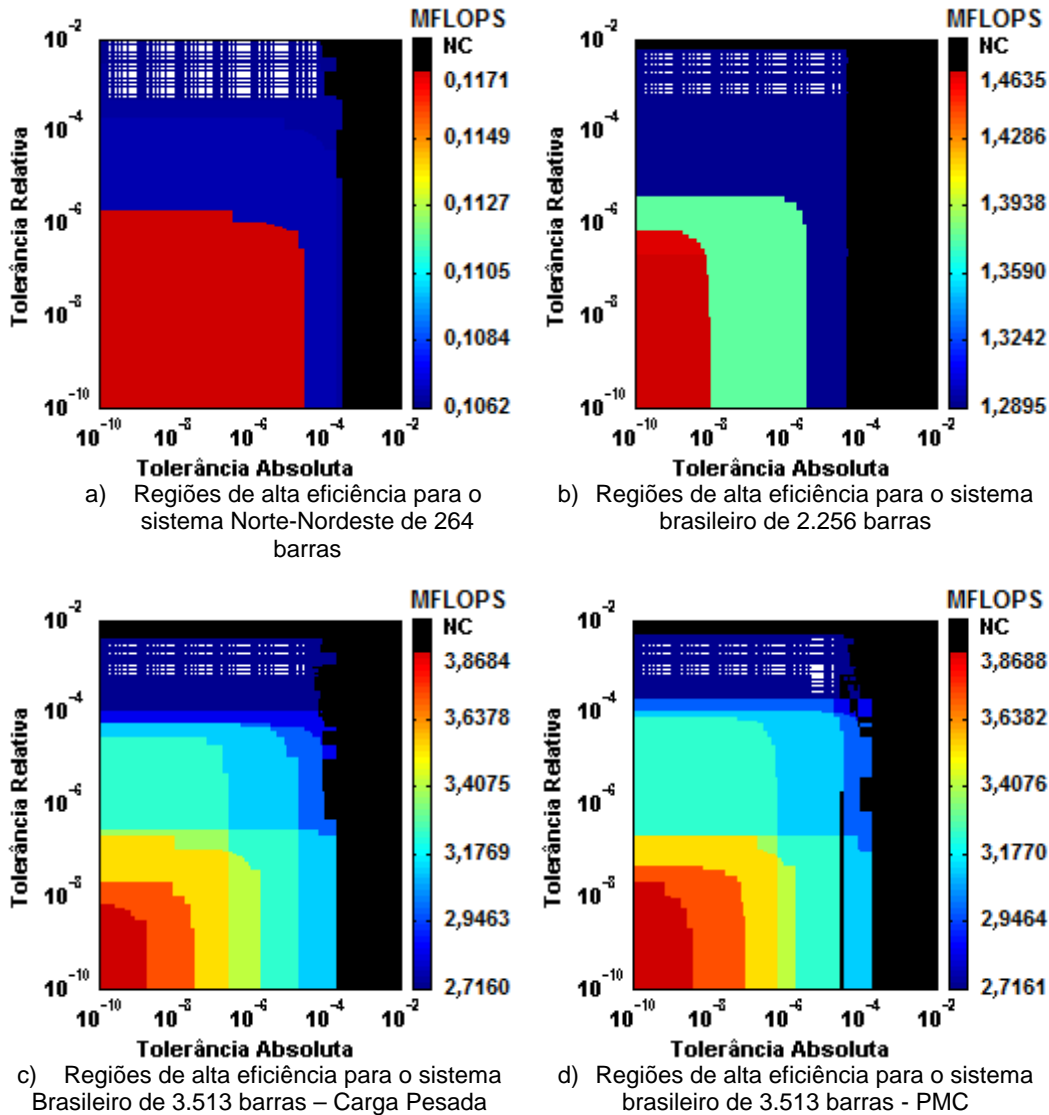


Figura 5.3 – Gráficos de alta eficiência em função das tolerâncias do GMRES para o solucionador GMRES+ILUT(τ, ρ)+MD.

A região azul corresponde às simulações que resultaram no menor número de operações de ponto flutuante, enquanto as regiões vermelhas correspondem às simulações que resultaram nos maiores números de operações de ponto flutuante. As barras ao lado dos gráficos fornecem informações sobre a evolução do número de operações à medida que os parâmetros se afastam das regiões vermelhas em direção às azuis, ou seja, as de melhor desempenho. Já as regiões em negrito correspondem aos casos não convergentes (NC). Observa-se que entre todos os valores registrados para MFLOPS_{\min} , a região que contém os casos com o menor MFLOPS_{\min} possível está em azul escuro e preenchida de pontos brancos. Este valor é chamado de número mínimo de operações possível ($\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$) e é apresentado na Tabela 5.6, para cada sistema elétrico.

Observa-se que em todos os gráficos de alta eficiência, as regiões de não-convergência não estão totalmente definidas e chegam a se misturar com as regiões de convergência, isto é, aparecem regiões de não-convergência ilhadas dentro de regiões de convergência, como a observada na Figura 5.3(d). Esta característica dificulta a segmentação das regiões de alta eficiência e dificulta a determinação de faixas recomendáveis. Para este tipo de solucionador, as regiões não convergentes (NC) são maiores que as registradas no solucionador proposto. Estas regiões ameaçam a robustez do solucionador e existem não só para valores próximos ou maiores que a tolerância usada no algoritmo Newton-Raphson (10^{-3}), como também para valores pequenos de tolerância absoluta (entre 10^{-5} e 10^{-4} , nas Figura 5.3(b-c-d)).

Tabela 5.6 – Menor número de operações possíveis realizadas pelo solucionador GMRES+ILUT(τ,ρ)+MD

Sistema	Número Mínimo de Operações MFLOPS _{óti}	Maior número de operações (maior MFLOPS _{mín})
Norte-Nordeste	0,1062	0,1171
Brasil 2256	1,2895	1,4635
Brasil 3515 Carga Pesada	2,7160	3,8684
Brasil 3515 - PMC	2,7161	3,8688

- **Delimitação das Tolerâncias do GMRES**

Em cada um dos gráficos de alta eficiência apresentados na Figura 5.1, é segmentada a região dos MFLOPS_{óti}. Esta região é de cor azul e se diferencia do resto pelos pontos brancos, cada um associado a uma combinação ($atol;rtol$) que apresenta o menor número de operações possível (MFLOPS_{óti}) em todo o espaço de busca.

A partir destes gráficos são encontradas as faixas de valores – ($atol_{mín};atol_{máx}$) e ($rtol_{mín};rtol_{máx}$) – recomendáveis para as tolerâncias do método GMRES associadas ao melhor desempenho possível, apresentadas na Tabela 5.3 para os quatro sistemas elétricos.

Tabela 5.7 – Faixas de valores recomendáveis para as tolerâncias do método GMRES

Sistema	Tolerância Absoluta ($atol_{\min}; atol_{\max}$)	Tolerância Relativa ($rtol_{\min}; rtol_{\max}$)
Norte-Nordeste	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 2,8 \cdot 10^{-5})$	$(6,2 \cdot 10^{-4}; 1,0 \cdot 10^{-2})$
Brasil 2256	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 3,7 \cdot 10^{-5})$	$(9,1 \cdot 10^{-4}; 5,5 \cdot 10^{-3})$
Brasil 3515 Carga Pesada	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 4,6 \cdot 10^{-5})$	$(2,3 \cdot 10^{-4}; 3,7 \cdot 10^{-3})$
Brasil 3515 Carga Crítica	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 6,4 \cdot 10^{-5})$	$(2,6 \cdot 10^{-4}; 4,6 \cdot 10^{-3})$
Interseção	$(1,0 \cdot 10^{-10}; 2,8 \cdot 10^{-5})$	$(9,1 \cdot 10^{-4}; 3,7 \cdot 10^{-3})$

Na última linha da Tabela 5.3 apresenta-se a interseção de todas as faixas. Qualquer valor da interseção das faixas pode ser usado no solucionador, garantindo a convergência no mínimo número de operações de ponto flutuante possível para os quatro sistemas elétricos.

- **Delimitação dos Parâmetros do Pré-condicionador**

No quarto e último passo, a partir das faixas $(1,0 \cdot 10^{-10}; 2,8 \cdot 10^{-5})$ para a tolerância absoluta e $(9,1 \cdot 10^{-4}; 3,7 \cdot 10^{-3})$ para a tolerância relativa do GMRES, é escolhido um valor para cada uma, isto é, $atol_{\acute{o}ti} = 1,0 \cdot 10^{-5}$ e $rtol_{\acute{o}ti} = 2,8 \cdot 10^{-3}$. Já que todas as tolerâncias dessas faixas têm o mesmo MFLOPS_{óti}, pode-se escolher qualquer valor. Estes valores são usados para delimitar os parâmetros do pré-condicionador nos quatro sistemas elétricos.

Nos gráficos de eficiência da Figura 5.4, associadas aos valores escolhidos para as tolerâncias $(atol_{\acute{o}ti}; rtol_{\acute{o}ti})$, são identificadas as regiões de melhor desempenho do solucionador em função dos parâmetros τ e ρ do pré-condicionador, para cada sistema elétrico. Cada gráfico apresenta em escala de cores o número de operações (MFLOPS) em função de suas correspondentes combinações (τ, ρ) .

A região azul corresponde às simulações que resultaram no menor número de operações de ponto flutuante, enquanto as regiões vermelhas correspondem às simulações que resultaram nos maiores números de operações de ponto flutuante. Os casos que realizaram o menor número de operações possível

(MFLOPS_{\min}) estão em azul escuro e preenchidos de pontos brancos (encerrados em um círculo). As barras ao lado dos gráficos fornecem informações sobre a evolução do número de operações à medida que os parâmetros se afastam das regiões vermelhas em direção às azuis, ou seja, as de melhor desempenho. Já as regiões em negrito correspondem aos casos que realizaram mais de duas vezes o número de operações mínimo ($>2 \cdot \text{MFLOPS}_{\min}$).

Observe-se que não é possível obter faixas – $(\tau_{\min}; \tau_{\max})$ e $(\rho_{\min}; \rho_{\max})$ – de valores recomendáveis para os parâmetros do pré-condicionador, já que existem poucos valores associados ao melhor desempenho possível $\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$ (pontos brancos) espalhados em diferentes posições. Estes valores são chamados de $\tau_{\text{óti}}$ e $\rho_{\text{óti}}$ e são apresentados na Tabela 5.8 para cada um dos sistemas elétricos avaliados.

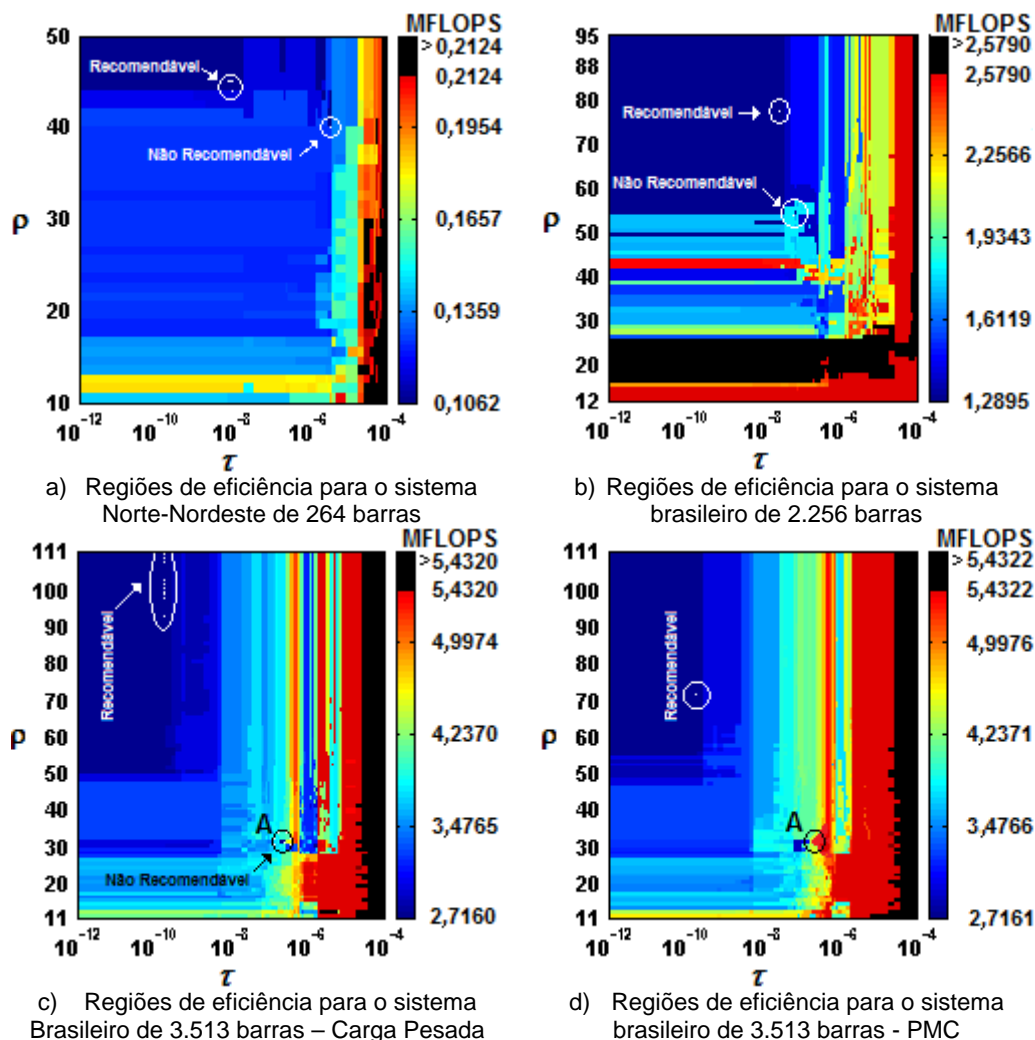


Figura 5.4 – Gráficos de eficiência em função dos parâmetros ρ e τ do pré-condicionador $\text{ILUT}(\tau, \rho)$

Tabela 5.8 – Valores recomendáveis para os parâmetros do pré-condicionador ILUT(τ, ρ)

Sistema	Valor ótimo $\tau_{\text{óti}}$	Valor ótimo $\rho_{\text{óti}}$
Norte-Nordeste	$1,0 \cdot 10^{-8}$	44
Brasil 2256	$2,8 \cdot 10^{-8}$	78
Brasil 3515 Carga Pesada	$1,9 \cdot 10^{-10}$	93
Brasil 3515 Carga Crítica	$1,9 \cdot 10^{-10}$	72

Regiões de alto desempenho (azuis) ilhadas dentro de regiões de baixo desempenho (amarelo ou vermelho) mostram que a regra de preenchimento de duplo parâmetro limitante falha na escolha dos elementos que devem ou não ser preenchidos, inserindo erros e afetando a convergência do solucionador. Teoricamente, a partir da definição da regra de preenchimento, se espera que, conforme o valor de τ aumente e o valor de ρ diminua, mais elementos devam ser descartados (começando pelos de menor tamanho). Conseqüentemente, o número de operações deveria primeiro diminuir até chegar a um limite (limite da região de alto desempenho) e depois deveria começar a aumentar (região de baixo desempenho). Em ambas as regiões os gráficos deveriam seguir uma seqüência de cores (azul, verde, amarelo e vermelho) e de tonalidades, de forma uniforme, sem misturá-las.

Na prática, em todos os gráficos observa-se que regiões de alto desempenho se misturam com as de baixo desempenho sem apresentar uma seqüência de cores e de tonalidade uniforme. Esta característica, além de dificultar a escolha dos valores apropriados para os parâmetros τ e ρ , também ilustra as deficiências da regra de preenchimento de duplo parâmetro limitante. Por exemplo, na Figura 5.4(c) o ponto A em negrito (circulado) é uma combinação ($\tau; \rho$) associada com o menor número de operações possível ($\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$), que aparentemente pode ser considerado uma boa opção, já que produz um ótimo desempenho. Porém, a escolha desses parâmetros causa péssimo desempenho quando usados no mesmo sistema elétrico no cenário (PMC), como visto na Figura 5.4(d). Normalmente, este tipo de problema aparece em pontos ($\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$) rodeados de regiões de baixo desempenho. Nos gráficos são indicados como “não recomendáveis”. As combinações ($\tau; \rho$) recomendáveis ($\text{MFLOPS}_{\text{óti}}$) são os

pontos brancos que aparecem dentro da maior região em azul escuro, na parte superior esquerda de todos os gráficos.

Com fins ilustrativos e comparativos, na Figura 5.5 são apresentados os gráficos de eficiência onde os problemas mencionados acima não acontecem, pois no pré-condicionador $ILUT(\tau, \rho)$ é adequada a regra de preenchimento baseada no erro, substituindo-se a regra convencional de duplo parâmetro limitante, resultando no pré-condicionador $ILUT(\xi, \tau)$ apresentado no capítulo (seção 4.5). Este pré-condicionador não foi considerado no solucionador proposto porque só permite adequar a regra de preenchimento baseada no erro no fator triangular L.

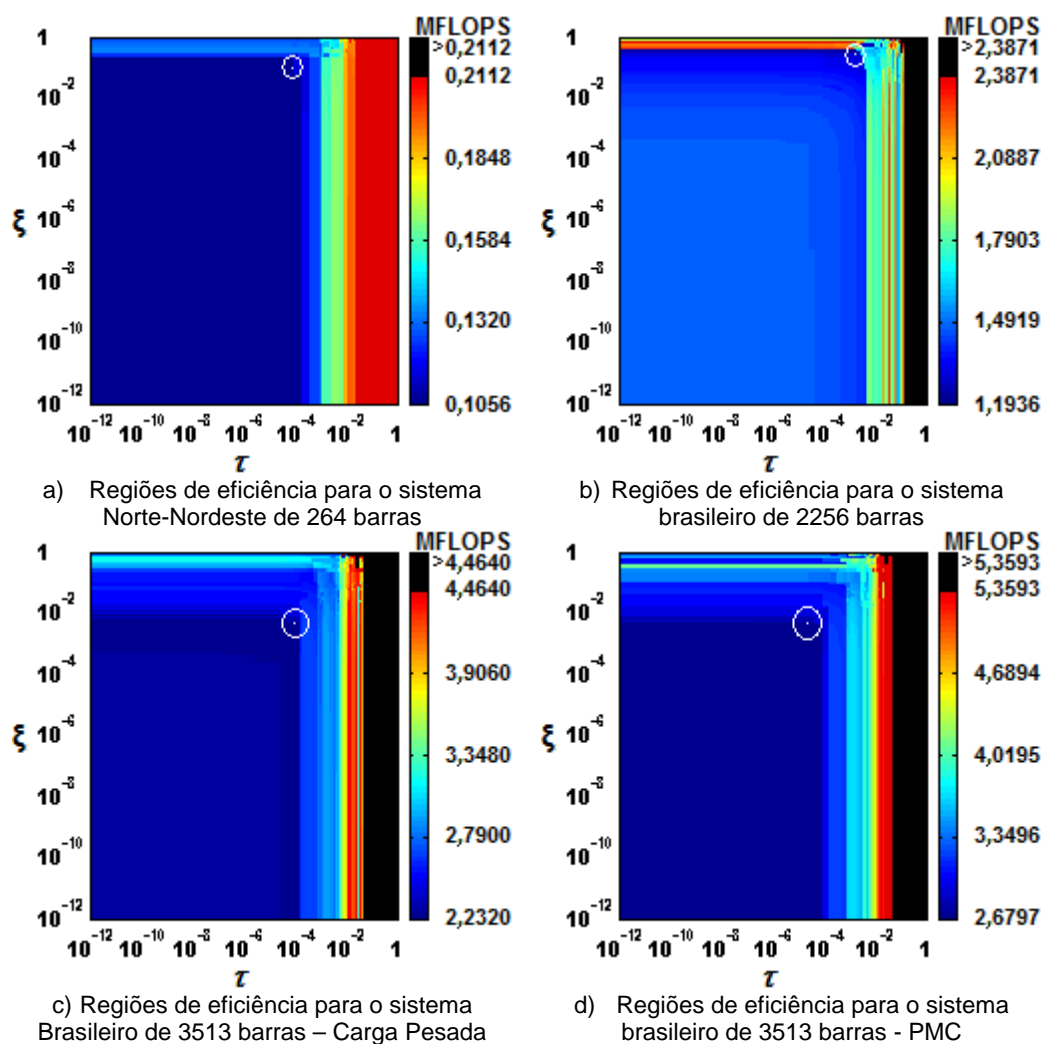


Figura 5.5 – Gráficos de eficiência em função dos parâmetros ξ e τ do pré-condicionador $ILUT(\xi, \tau)$

Com o intuito de realizar uma comparação justa, os gráficos da Figura 5.5 foram reproduzidos nas mesmas condições e cenários que os utilizados para

reproduzir os gráficos de eficiência da Figura 5.4, usando-se as mesmas tolerâncias para o GMRES.

Observa-se que só o fato de incluir a regra de preenchimento em L já atenua bastante os problemas associados às falhas da regra de preenchimento do pré-condicionador $ILUT(\tau, \rho)$. Neste caso, as regiões de alto desempenho (azuis) são maiores que as regiões de baixo desempenho. Em todos os gráficos observa-se que as seqüências de cores e de tonalidades são uniformes e algumas uniformidades podem ser ainda observadas nas pequenas regiões de baixo desempenho, causadas pela regra de preenchimento usada em U. Também, o menor número de operações ($MFLOPS_{\delta_{ti}}$) diminui se comparado ao conseguido pelo $ILUT(\tau, \rho)$. Com estes gráficos, verifica-se que a regra de preenchimento é mais eficaz e resolve os problemas da regra de duplo parâmetro limitante do $ILUT(\tau, \rho)$ detectado aqui.

Os valores dos parâmetros encontrados nas seções anteriores, tanto para o solucionador proposto como para o solucionador $GMRES+ILUT(\tau, \rho)+MD$, apresentados na Tabela 5.4 e Tabela 5.8, são usados nas próximas simulações para avaliação do desempenho do solucionador em termos de eficiência computacional e robustez.

5.2.3 Desempenho em Termos de Eficiência Computacional

Na Figura 5.6 apresenta-se um gráficos de barras com o número de operações de ponto flutuante e o tempo de CPU total gasto para solucionar os sistemas lineares resultantes do Newton-Raphson associado ao solucionador iterativo proposto $GMRES+ILU(\xi)+MD$, o $GMRES+ILUT(\tau, \rho)+MD$ e ao solucionador direto MA28 (fatoração LU e reordenamento minimum degree), para os sistemas-teste norte-nordeste de 274 barras, a configuração do sistema brasileiro de 2.256 barras e uma configuração do sistema brasileiro de 3.513 barras para dois cenários de carga – pesada e PMC. Observa-se em todos os gráficos que tanto o solucionador proposto como o $GMRES+ILUT(\tau, \rho)+MD$ realizam menos operações que o método direto. Comparando-se os resultados do método direto e do solucionador proposto, verifica-se que o solucionador direto realizou 41.483, 2.134.358, 1.762.907 e 1.576.999 operações adicionais às realizadas pelo solucionador proposto durante a solução de fluxo de carga dos sistemas norte-

nordeste, brasileiro de 2256 barras, brasileiro de 3.513 barras (carga pesada) e brasileiro de 3.513 barras (PMC), respectivamente. Estes resultados comprovam que, pelo menos em comparação ao MA28 e ao GMRES+ILUT(τ,ρ)+MD, o solucionador proposto foi bem mais eficiente.

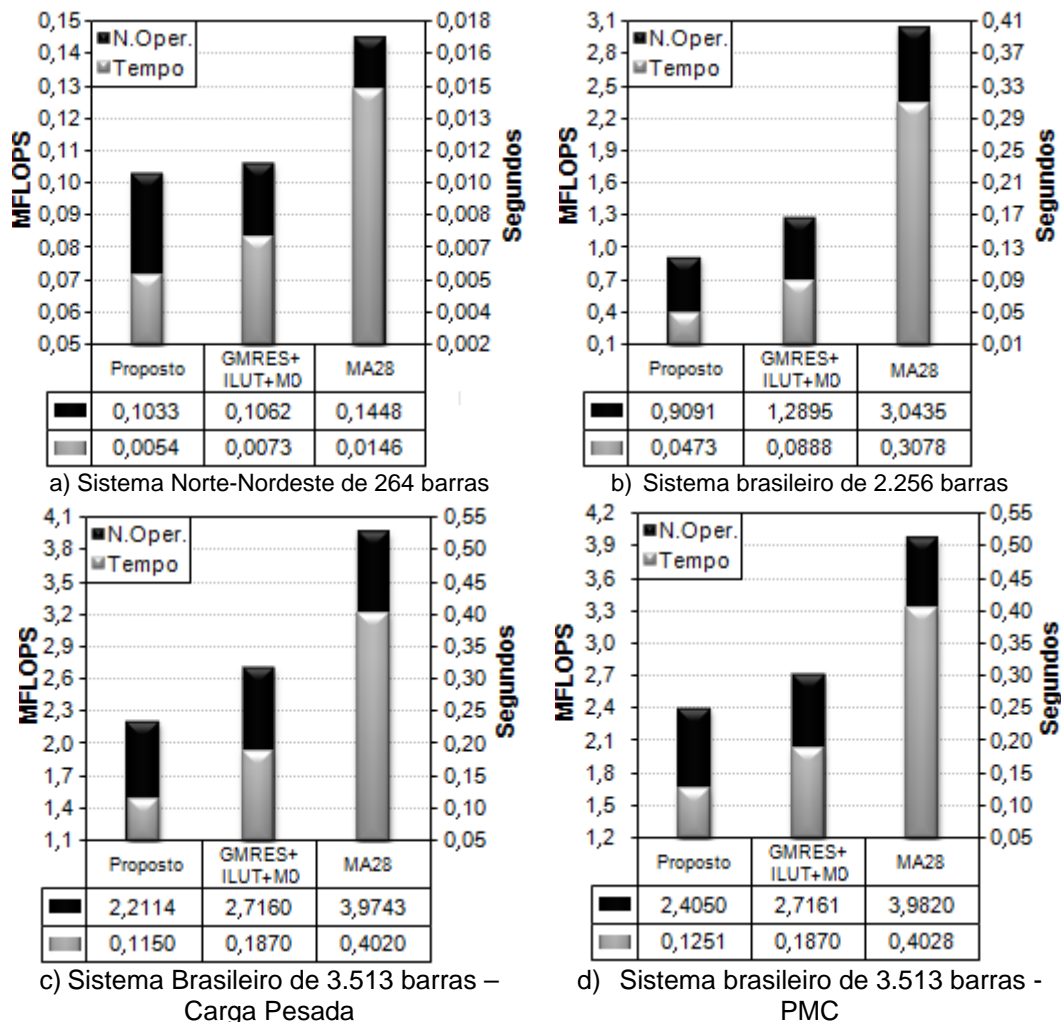


Figura 5.6 – Número de operações e tempo de CPU dos solucionadores iterativos e direto

5.2.4 Desempenho dos Pré-condicionadores

Na Figura 5.7 apresenta-se através de gráficos de barras o número de operações de ponto flutuante do GMRES realizadas durante a simulação de fluxo de carga, quando usado o pré-condicionador proposto ILU(ξ) e o ILUT(τ,ρ). As barras brancas representam o número de MFLOPS realizadas pelo pré-condicionador (para todas as iterações Newton-Raphson), as barras cinza

representam o número de MFLOPS realizadas em todas as iterações GMRES, as barras em negrito são a soma dos MFLOPS das barras brancas e cinzas. Os gráficos de barras são apresentados para comparar os efeitos no número de MFLOPS causados pelos pré-condicionadores $ILUT(\tau,\rho)$ e $ILU(\xi)$.

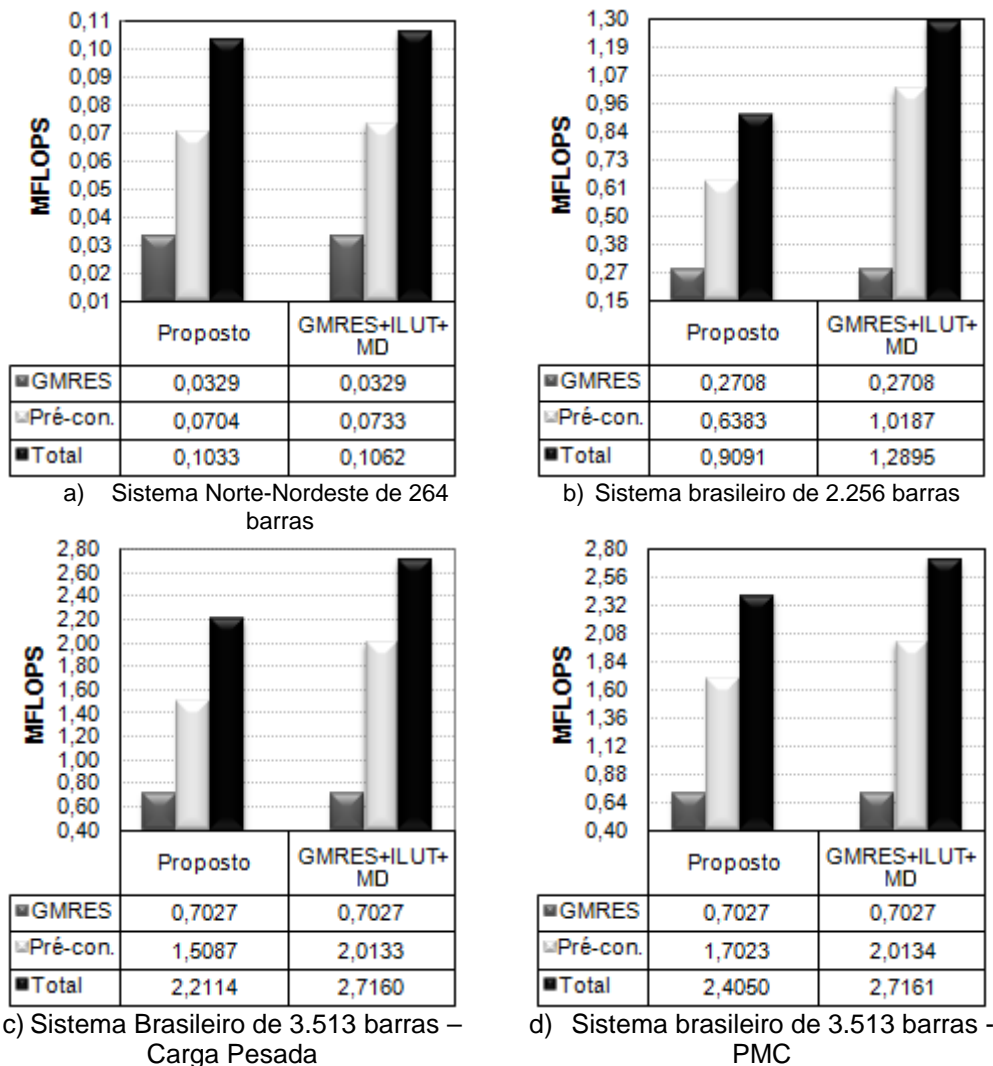


Figura 5.7 – Número de operações do GMRES e do Pré-condicionador

Observa-se em todos os gráficos que as operações realizadas pelo pré-condicionador representam a maior parte do total de operações realizadas pelo solucionador. O solucionador proposto é mais eficiente que o solucionador $GMRES+ILUT(\tau,\rho)+MD$, pois realiza menos operações com o pré-condicionador $ILU(\xi)$. Entretanto, o pré-condicionador $ILU(\xi)$ realiza menos operações que o $ILUT(\tau,\rho)$ já que possui uma regra de preenchimento baseada no erro que permite descartar uma maior quantidade de elementos dos fatores triangulares, tanto novos elementos não-nulos como também elementos que ocupam as posições da matriz Jacobiana, como é verificado em seguida.

Na Tabela 5.9 e nos gráficos da Figura 5.8 são mostradas informações sobre os novos elementos não-nulos descartados (NED), os novos elementos não-nulos preenchidos (NEP), os antigos elementos não-nulos descartados (AED) e os antigos elementos não-nulos preenchidos (AEP) durante a construção dos pré-condicionadores $ILU(\xi)$ e $ILUT(\tau, \rho)$, para os quatro sistemas-teste. Entenda-se por antigos elementos, aqueles que ocupam as posições preenchidas da matriz Jacobiana. Na Tabela 5.9 apresenta-se o número de elementos preenchidos e descartados nos fatores triangulares, associados com os valores percentuais da Figura 5.8. Observa-se que quando usada a regra de preenchimento baseada no erro descartam-se mais elementos que quando usada a regra de duplo parâmetro limitante. Estes resultados mostram que a regra de preenchimento baseada no erro do $ILU(\xi)$ é a mais eficiente quando escolhe que elementos devem ser preenchidos ou descartados. Observa-se também que a regra de preenchimento baseada no erro descartou mais elementos antigos (AED) que a regra de duplo parâmetro limitante do $ILUT(\tau, \rho)$.

Tabela 5.9 – Informações sobre o número de preenchidos ou descartados nos fatores triangulares L e U

Sistema Elétrico	Solucionador	Novos Elementos		Antigos Elementos	
		Preenchidos (NEP)	Descartados (NED)	Preenchidos (AEP)	Descartados (AED)
Norte-Nordeste	GMRES+ $ILUT(\tau, \rho)$ +MD	1.066	7	3.129	187
	Proposto	1.008	65	3.077	239
Brasil de 2.256 barras	GMRES+ $ILUT(\tau, \rho)$ +MD	13.598	428	29.030	1.888
	Proposto	12.331	1.695	22.825	8.093
Brasil de 3.513 barras - Pesada	GMRES+ $ILUT(\tau, \rho)$ +MD	15.722	68	41.902	2.398
	Proposto	12.936	2.854	41.449	8.521
Brasil de 3.513 barras - PMC	GMRES+ $ILUT(\tau, \rho)$ +MD	15.619	171	41.900	2.400
	Proposto	12.834	2.956	36.967	7.333

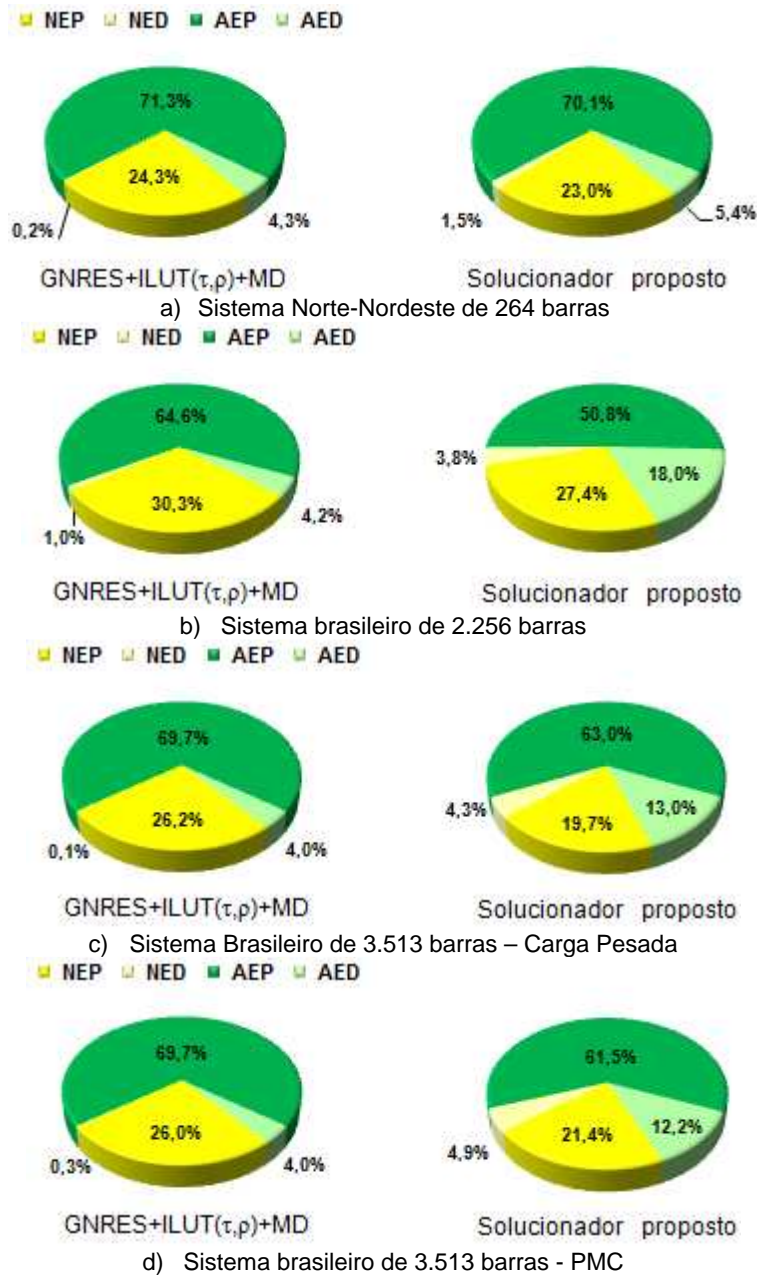


Figura 5.8 – Percentagem de elementos descartados e preenchidos nos pré-condicionadores

5.2.5 Desempenho em Termos de Robustez

O objetivo aqui é verificar que a estratégia de pré-condicionamento $ILU(\xi)$ é fundamental para garantir a robustez do solucionador proposto. Conforme mencionado no capítulo 3, esta estratégia visa melhorar as propriedades espectrais (condicionamento e autovalores) da matriz Jacobiana antes de iniciado o processo iterativo no GMRES, transformando implicitamente o sistema linear original em outro equivalente, cuja matriz de coeficientes é muito próxima

da matriz identidade, possuindo, conseqüentemente, menor número de condicionamento e autovalores com módulos pequenos, agrupados próximos de um (1). O principal benefício de se ter um sistema equivalente melhor condicionado é o aumento da estabilidade numérica (diminuição do erro de arredondamento) durante a construção do pré-condicionador, melhorando sua qualidade e robustez.

O sistema usado para esta simulação é uma configuração do sistema IEEE118-barras (Apêndice VII). Optou-se por este sistema devido à disponibilidade de um cenário (Carga Crítica) com um nível total de carga bastante elevado (7.322,36 MW e 2.482,21 MVar), correspondendo a um ponto de operação não convergente no programa ANAREDE. Verifica-se que o solucionador proposto consegue resolver o problema para esta condição de operação. O pré-condicionador considerado nesta simulação é o pré-condicionador proposto ILU(ξ) e usa a regra de preenchimento baseada no erro.

Na Tabela 5.10 apresentam-se os tempos de CPU e observa-se que sem pré-condicionamento o método GMRES não consegue convergir (estagnação), nem através dos solucionadores diretos do programa ANAREDE e ORGANON (usando o método de fluxo de carga convencional com modelos estáticos). Porém, quando simulado o fluxo de carga por dinâmica sintética, o programa ORGANON consegue convergência após 0,563 segundos, enquanto que o solucionador proposto precisou apenas de 0,008 segundos.

Na Figura 5.9 compara-se o número de condicionamento de matrizes Jacobianas geradas em cada iteração do algoritmo Newton-Raphson de fluxo de carga, para três cenários, sendo estes: carga normal (4.242,00 MW e 1.438,00 MVar), carga pesada (7.316,86 MW e 2.480,35 MVar) e carga crítica (7.322,36 MW e 2.482,21 MVar). O cenário de carga crítica é o cenário não convergente nos métodos diretos, avaliados acima. Observe-se que neste cenário, o algoritmo Newton-Raphson precisa realizar 14 iterações antes de convergir. Já nos cenários de carga normal e pesada, que convergem nos solucionadores diretos, são necessárias apenas três e sete iterações, respectivamente. O gráfico da Figura 5.9 ilustra claramente que o número de condicionamento das matrizes Jacobianas aumenta conforme os sistemas se tornam mais carregados. O gráfico também mostra que o cenário de carga crítica possui em todas as

iterações o pior condicionamento, apresentando os maiores valores nas últimas iterações.

Tabela 5.10 – Tempo CPU da simulação de fluxo de carga para o sistema IEEE118-barras

Solucionadores Iterativos	
GMRES puro	Não-convergente
GMRES+ILU(ξ)+MD (proposto)	0,008(seg.)
Solucionadores Diretos	
Anarede	Não-convergente
Organon (fluxo de carga convencional)	Não-convergente
Organon (fluxo de carga por dinâmica sintética)	0,563(seg.)

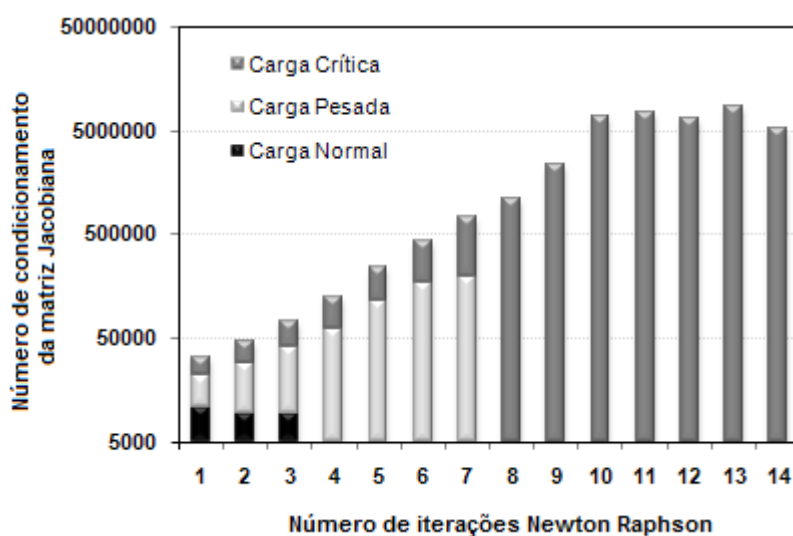


Figura 5.9 – Comparação do condicionamento das matrizes Jacobianas em cada iteração Newton-Raphson, para três cenários de carga

Na Tabela 5.11 apresenta-se a média aritmética do número de condicionamento das 14 matrizes Jacobianas não pré-condicionadas (2.792.687). Este número é comparado com a média aritmética dos números de condicionamento das 14 matrizes Jacobianas pré-condicionadas pelo ILU(ξ) (1,1046). Comparando ambos os números (2.792.687 e 1,1046) pode-se concluir que tanto o método

GMRES (puro) quanto os solucionadores diretos falham devido ao mau condicionamento dos sistemas lineares não pré-condicionados. No entanto, o GMRES não falha quando soluciona os sistemas equivalentes pré-condicionados pelo ILU(ξ) e com números de condicionamento pequenos.

Tabela 5.11 – Número de condicionamento do sistema pré-condicionado e não pré-condicionado

Média do Número de Condicionamento das 14 Matrizes Jacobianas	
Sem pré-condicionador	2.792.687
Com pré-condicionador ILU(ξ)	1,1046

Na Figura 5.10 apresenta-se o gráfico dos autovalores da matriz Jacobiana não pré-condicionada da décima iteração. Observa-se que os autovalores aparecem próximos da origem do plano complexo, com parte real negativa e positiva, indicando que, para este sistema, a matriz Jacobiana está próxima da singularidade e é indefinida, propriedades espectrais similares também acontecem nas matrizes associadas às iterações 11, 12, 13 e 14. Conforme mencionado no Capítulo 2, para matrizes com estas características os métodos iterativos podem apresentar convergência deficiente ou até falhar, sendo, portanto, necessário o uso de pré-condicionadores para que o solucionador iterativo consiga convergir (Benzi, 2002; Chen, 2005). Portanto, esta matriz além de ser mal-condicionada e estar próxima da singularidade, também é indefinida, e estas características dificultam ainda mais a solução do sistema linear.

Já na Figura 5.11 é apresentada a mesma matriz, a da décima iteração, desta vez pré-condicionada pelo ILU(ξ). Observa-se que todos seus autovalores estão agrupados próximos de um (1) e grande parte afastada da origem do plano complexo. Esta característica indica que o sistema pré-condicionado está mais afastado da singularidade. Observa-se também que os autovalores possuem parte real sempre positiva, o sistema linear que antes era indefinido (Figura 5.10), agora é definido. Neste caso, o GMRES não pré-condicionado que antes falhou, tende a apresentar uma rápida convergência livre de falhas (Benzi, 2002; Chen, 2005), como realmente observado.

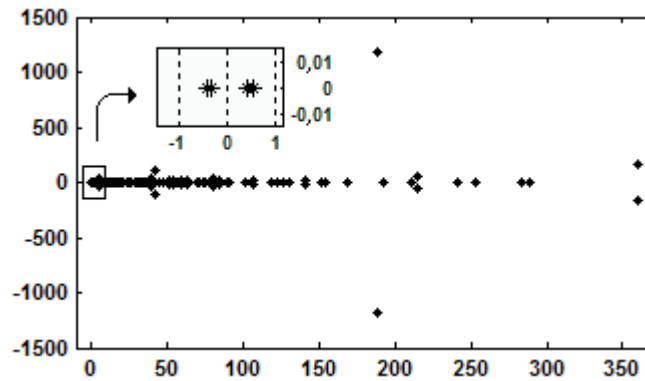


Figura 5.10 – Espectro da matriz Jacobiana sem pré-condicionamento

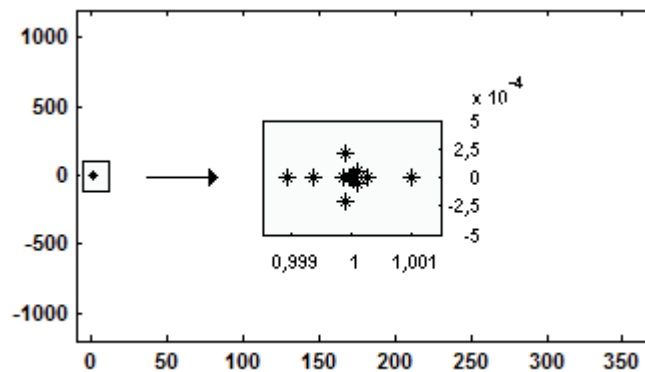


Figura 5.11 – Espectro da matriz Jacobiana pré-condicionada

5.3

Avaliação do Desempenho do Solucionador em Análise de Contingências: Múltiplos Cenários Diferentes

Um grande número de simulações de fluxo de carga integra a análise de contingências, cada uma delas gerando um cenário diferente do caso base. Portanto, este tipo de análise é apropriado para testar tanto a robustez do solucionador proposto como também a eficácia dos parâmetros do solucionador ajustados pelo método proposto.

Nesta seção, o solucionador proposto é testado no Sistema Interligado Nacional correspondente ao ano 2006 do cenário de carga pesada. Foram analisados 4.953 casos de contingências que consistem no desligamento dos circuitos de todo o sistema. Dos 4.953 casos, 3.267 contingências foram executadas com sucesso, 56 contingências apresentaram problemas de convergência e o resto não foram simuladas devido à existência de ilhas no sistema sem barra slack. O objetivo destas simulações é verificar a robustez e eficiência computacional do solucionador proposto para diferentes cenários do Sistema Interligado Nacional.

Na Figura 5.12 compara-se o número de operações de ponto flutuante (em MFLOPS) realizadas pelo solucionador proposto e pelo solucionador direto MA28, para cada uma das contingências simuladas, mostrando que o solucionador proposto é mais eficiente. Observa-se que em contingências onde o solucionador direto precisou de várias operações, o solucionador iterativo precisou de poucas. Por exemplo, a contingência 2.961 cujo circuito é da barra 2282 PIONEIROS138 para a barra 2286 RES+GUAN-138 precisou de 6,4909 MFLOPS no solucionador direto, enquanto que no solucionador proposto precisou de apenas 2,2434 MFLOPS. Ambos solucionadores conseguiram resolver com sucesso as 3,267 contingências.

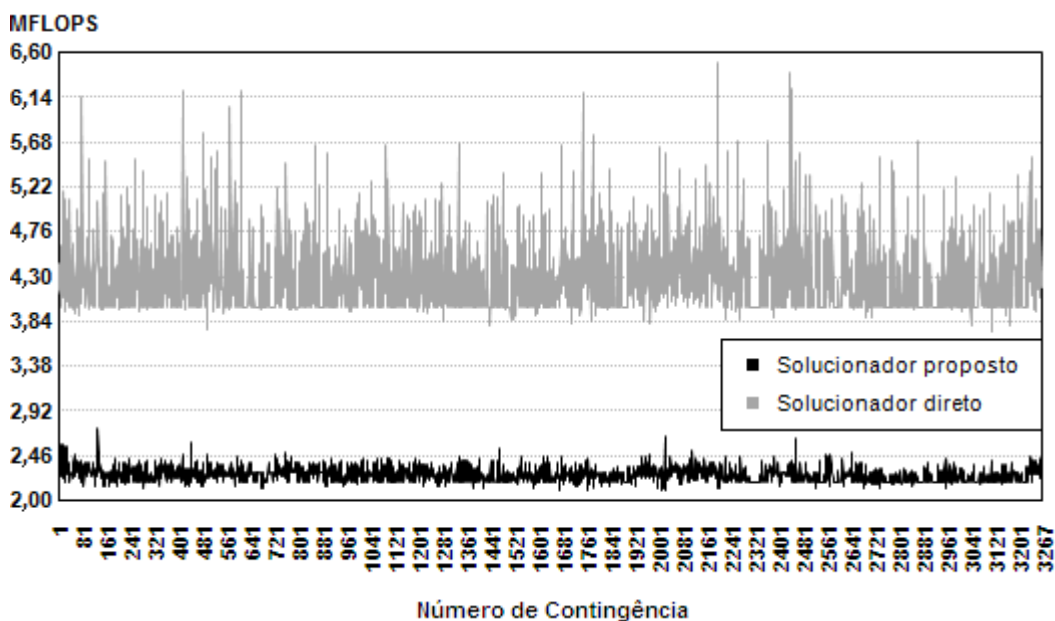


Figura 5.12 – Número de operações de ponto flutuante realizados pelo solucionador proposto e o solucionador direto em cada contingência

Na Figura 5.13 compara-se o número de operações (MFLOPS) realizadas pelo solucionador proposto e pelo solucionador GMRES+ILUT(τ, ρ)+MD, para as 3.267 contingências simuladas. O gráfico mostra que o solucionador proposto também é mais eficiente em para todas as contingências.

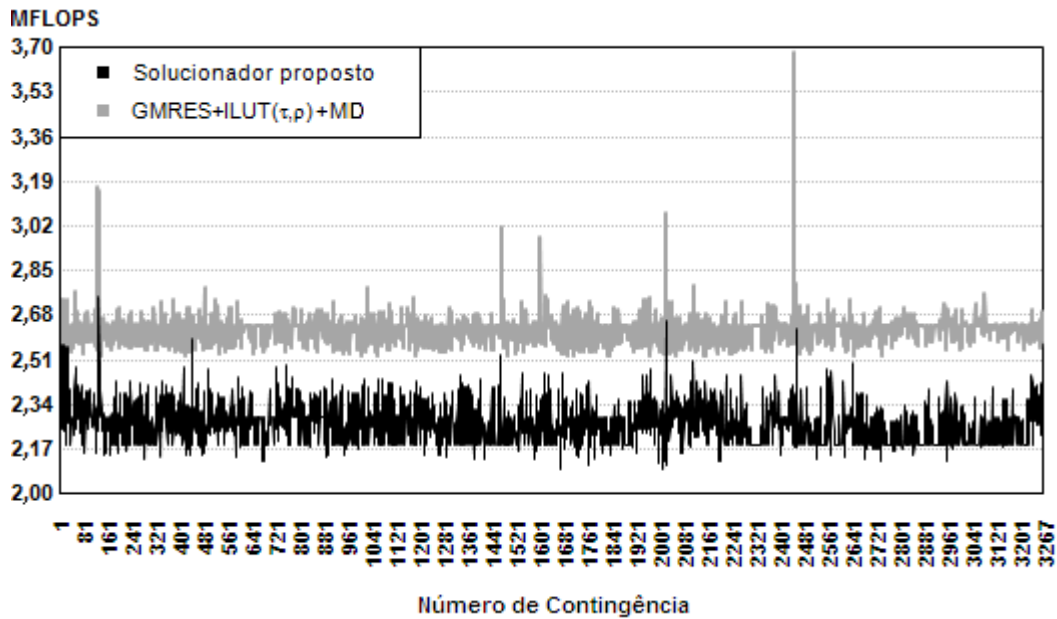


Figura 5.13 – Número de operações de ponto flutuante realizados pelos Solucionador d e pelo GMRES+ILUT(τ,ρ)+MD em cada contingência

Na Tabela 5.12 apresentam-se os tempos de CPU gastos na solução de todas as contingências pelos três solucionadores avaliados, em segundos(s) e minutos(m). Observa-se que o solucionador proposto foi duas vezes mais rápido que o solucionador iterativo GMRES+ILUT(τ,ρ)+MD e 5,2 vezes mais rápido que o direto.

Tabela 5.12 – Tempo de CPU total gasto na solução de todas as contingências

Solucionadores	Tempo de CPU	
Proposto GMRES+ILUT(ξ)+MD	193,2(s)	3,22(m)
GMRES+ILUT(τ,ρ)+MD	403,8(s)	6,73(m)
Direto (MA28)	1.010,2(s)	16,84(m)

5.4 Comentários Finais

Este capítulo teve como objetivo ilustrar com sistemas-teste reais a eficiência e robustez do solucionador iterativo proposto e estratégias associadas, com destaque para o método de procura de parâmetros ótimos do pré-condicionador baseada no erro, e também do pré-condicionador de parâmetros limitantes.

Usou-se para fins comparativos um solucionador direto e dois programas computacionais comerciais, usados por concessionárias de energia elétrica no Brasil. Note que não é objetivo deste trabalho fazer qualquer tipo de depreciação a esses programas, mas devido principalmente as suas excelentes características, como confiabilidade, eficiência e ampla utilização e aceitação pelo setor elétrico e pelo acadêmico, são, sem dúvida, excelentes fontes para avaliar a robustez e eficiência do solucionador proposto.