



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO



GUILHERME FERNANDES DOS SANTOS

AJUSTE DOS GANHOS DE UM REGULADOR DE VELOCIDADE TIPO
PI PARA ACIONAMENTO ELÉTRICO A VELOCIDADE VARIÁVEL
UTILIZANDO-SE O ALGORITMO *SIMULATED ANNEALING*

GOIÂNIA – GO

2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

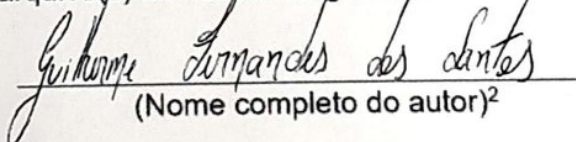
Nome completo do autor: Guilherme Fernandes dos Santos

Título do trabalho: Ajuste dos Ganhos de um Regulador de Velocidade do tipo PI para Acionamento Elétrico a Velocidade Variável Utilizando-se o Algoritmo *Simulated Annealing*.

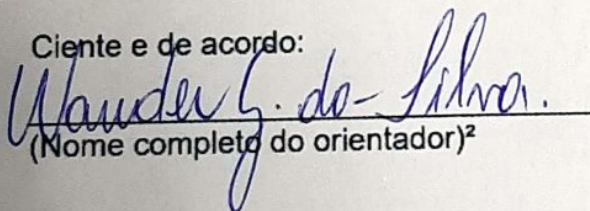
2. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.


(Nome completo do autor)²

Ciente e de acordo:


(Nome completo do orientador)²

Data: 19 / 12 / 2019

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

GUILHERME FERNANDES DOS SANTOS

**AJUSTE DOS GANHOS DE UM REGULADOR DE
VELOCIDADE TIPO PI PARA ACIONAMENTO ELÉTRICO A
VELOCIDADE VARIÁVEL UTILIZANDO-SE O ALGORITMO
SIMULATED ANNEALING**

Trabalho submetido à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica sob orientação do Professor Dr. Wander Gonçalves da Silva.

Goiânia
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Fernandes, Guilherme

Ajuste dos Ganhos de um Regulador de Velocidade Tipo PI para Acionamento Elétrico a Velocidade Variável Utilizando-se o Algoritmo Simulated Annealing [manuscrito] / Guilherme Fernandes. - 2019.

15 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Wander Gonçalves da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2019.

Bibliografia.

Inclui siglas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos.

1. Simulated Annealing. 2. Sistemas de Controle. 3. Otimização. 4. Controlador tipo PI. 5. Métodos Heurísticos . I. Gonçalves da Silva, Wander, orient. II. Título.

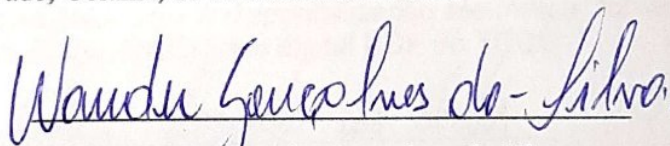
CDU 621.3

GUILHERME FERNANDES DOS SANTOS

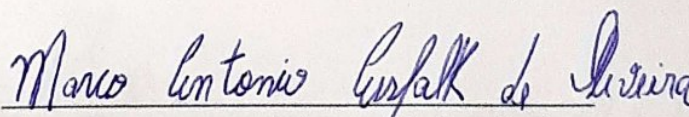
**AJUSTE DOS GANHOS DE UM REGULADOR DE
VELOCIDADE TIPO PI PARA ACIONAMENTO ELÉTRICO A
VELOCIDADE VARIÁVEL UTILIZANDO-SE O ALGORITMO
*SIMULATED ANNEALING***

Projeto Final de Curso apresentado à
Escola de Engenharia Elétrica,
Mecânica e de Computação da
Universidade Federal de Goiás, como
requisito parcial para obtenção do título
de Engenheiro Eletricista.

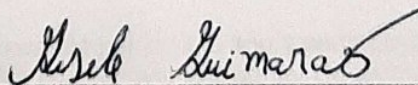
Trabalho aprovado, Goiânia, 18 de dezembro de 2019



Prof. Dr. Wander Gonçalves da Silva
Orientador



Prof. Dr. Marco Antônio Assfalk de Oliveira
Examinador Interno



Profa. Dra. Gisele Guimarães
Examinador Interno

Goiânia
2019

Ajuste dos Ganhos de um Regulador de Velocidade Tipo PI para Acionamento Elétrico a Velocidade Variável Utilizando-se o Algoritmo *Simulated Annealing*

Fernandes, Guilherme

Resumo—O projeto consiste em desenvolver um algoritmo, no ambiente MATLAB®, para se determinar o melhor ajuste do regulador PI de velocidade para acionamento elétrico utilizando-se o método denominado *Simulated Annealing*. Foi considerado um motor CC de excitação independente com malha interna de regulação de corrente, utilizando-se também um regulador PI, ajustado de forma que, para um determinado valor de corrente de armadura de referência, a tensão de armadura do motor CC não ultrapasse seu valor nominal. A regulação de velocidade por sua vez, foi realizada em uma malha externa utilizando-se também um regulador tipo PI. Com o objetivo de limitar a demanda de corrente determinada pelo regulador de velocidade, seus ganhos foram limitados de forma que a corrente de armadura de referência não ultrapasse seu valor nominal. Foi ainda considerado o caso não linear onde um saturador foi colocando-se um saturador na saída do regulador de velocidade, tornando o sistema não linear. O modelo do acionamento elétrico com regulação de velocidade foi, por sua vez, desenvolvido no ambiente SIMULINK®.

Palavras-chave—*Simulated Annealing, Sistemas de controle, Métodos heurísticos, Otimização, Controlador PI.*

Abstract—The project consists in developing an algorithm in the MATLAB® environment to find the best tuning for a PI speed controller using the Simulated Annealing Method. An independently excited DC motor with an inner armature current control loop with another PI controller was used and modelled in the SIMULINK® environment. In order to keep the system linear, the gains of the PI current controller are adjusted so that, for the rated armature current reference, the armature voltage applied to the motor does not exceed its rated value. The speed control was realized in an outer control loop with the gains limited so that, for a specific speed demand, the armature current reference does not exceed its rated value. A nonlinear model was considered where a saturator block was placed at the exit of the PI speed controller to limit the armature current reference to the PI current controller.

Index Terms— *Simulated Annealing, Control systems, Heuristic methods, Optimization, Regulator PI*

I. INTRODUÇÃO

Em meio a tempos tão conscientizados acerca da utilização dos recursos naturais e renováveis do planeta, os sistemas de energia elétrica requerem que utilizemos todas as fontes e as usemos da forma mais eficiente possível. Tem-se hoje que quase dois terços da energia elétrica que utilizamos está sendo consumida por sistemas acionados por motores [1]. Em grande

parte desses casos uma variação apropriada da velocidade de rotação com base nas condições operacionais podem fazer com que o sistema se mostre muito mais eficiente.

Historicamente as máquinas elétricas existem a mais de um século, com sua função básica em acionar cargas mecânicas por conversão de energia elétrica. Quando não existe o elemento de controle, os motores tem sua operação sob uma velocidade constante, e assim foi o seu funcionamento por muito tempo. Devido as crescentes necessidades, na atualidade os processos industriais são controlados eletronicamente com acionamentos de velocidade ajustável [2].

Existem alguns pontos que podem ser considerados como responsáveis pelo crescimento vertiginoso dos acionamentos elétricos nas últimas décadas, primeiramente pode se colocar os constantes avanços técnicos, no qual os controladores utilizados se beneficiaram das enormes melhorias nos métodos de microeletrônica, resultando em circuitos integrados e processadores digitais cada vez mais potentes. A melhorias tecnológicas em grande parte dos casos partem das necessidades de mercado, no qual esse vem crescendo a uma taxa expressiva, conforme se enxerga os benefícios que incluem processos de controle como redução na utilização de energia, menos manutenção, maior eficiência e confiabilidade além de um número menor de trabalhadores envolvidos [3].

Na realização deste trabalho o enfoque está diretamente associado ao elemento controlador do sistema de acionamento elétrico, onde procura-se estabelecer e determinar os ganhos do mesmo, e para tal muitas técnicas podem ser usadas para determinar os parâmetros de um controlador PI (Proporcional-Integral), tais como: Método do Lugar das Raízes, Nyquist, análises no domínio da frequência e técnicas adaptativas [4]. Todas essas diferentes formas pertencem ao escopo clássico da literatura de controle para abordagem de problemas lineares. Além delas, existe uma gama de métodos ditos heurísticos para resolver problemas de otimização, nos quais utilizam conhecimentos de outras áreas para desenvolver algoritmos que se adaptem aos objetos de estudo. Dentre algumas meta-heurísticas bem conhecidas, cita-se o Algoritmo genético, Colônia de formigas, Colônia de abelhas e Busca Tabu.

Neste trabalho, é investigada a aplicação do algoritmo de busca estocástica, denominado *Simulated Annealing (SA)*. Tal análise é realizada usando um motor CC de excitação independente, que consiste em um motor excitado externamente pelo seu circuito de campo, e são estes os motores

mais aplicados com conversores CA/CC na indústria. O modelo utilizado possui uma malha interna de regulação de corrente com um controlador tipo PI, com valores de ganhos já ajustados conforme um modelo. Além de uma malha externa para regulação de velocidade com também um controlador tipo PI, em que deseja-se trabalhar em cima dos seus respectivos ganhos, associando-os as respostas de velocidade e corrente de armadura. Todo o modelo de acionamento elétrico com regulação de velocidade fora desenvolvido no ambiente SIMULINK®.

II. REVISÃO DA LITERATURA

Os primeiros sistemas de potência elétrica eram de corrente contínua, mas a partir da década de 1980, os sistemas em corrente alternada foram ganhando mais força e ultrapassando-os. Apesar disso, ainda hoje existem aplicações nas quais os motores CC ainda são utilizados, principalmente após a descoberta dos retificadores controlados, como em máquinas de papel, laminadores, extrusoras, formas de cimento etc.

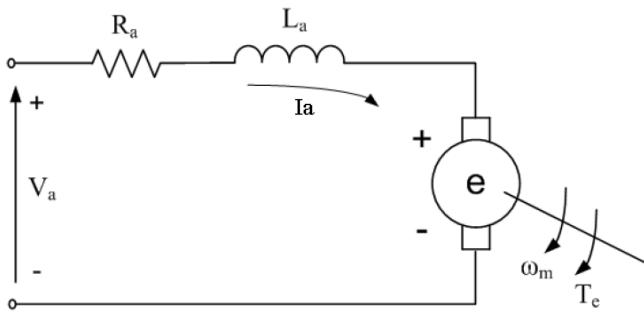


Fig. 1. Representação esquemática do Motor CC

A Fig. 1 representa o modelo de um motor CC controlado por armadura. Para se tratar e manipular parâmetros de modo a se obter comportamentos desejados para o motor CC, se faz necessário sua modelagem.

O diagrama de blocos é uma representação gráfica de um processo ou modelo de um sistema complexo, através de figuras geométricas e ligações, descrevendo um fluxo de informação [6].

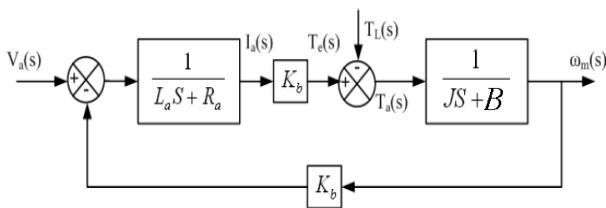


Fig. 2. Representação em diagrama de blocos do motor CC sem regulação

O primeiro bloco do diagrama, representa os parâmetros elétricos do sistema e o segundo bloco os mecânicos. Na Fig.2 tem-se um modelo sem qualquer regulação, então se relacionando a velocidade do eixo do rotor com a tensão de entrada do circuito. Sua função de transferência é dada por:

$$G(s) = \frac{Wm(s)}{Va(s)} = \frac{Kb}{JLas^2 + (BLa + JRa)s + (BRa + Kb^2)} \quad (1)$$

Tendo o modelo com seus parâmetros representados na Tabela 1, as saídas de velocidade e de corrente de armadura são ilustradas na Fig.3. O tempo de simulação foi de 0,2 segundos com um conjugado resistivo, T_L , constante.

TABELA I
PARAMÉTRIOS ELÉTRICOS E MECÂNICOS DO MOTOR CC
UTILIZADO

Símbolo	Variável	Valor
V_a	tensão de armadura	220V
L_a	indutância de armadura	3 mH
R_a	resistência de armadura	0,05 Ω
J	momento de inércia	0,0167 $kg \cdot m^2$
B	coeficiente de atrito	0,01 $N \cdot m / (rad/s)$
$ K_b $	constante de proporcionalidade	0,8
T_L	conjugado resistente	8 $N \cdot m$

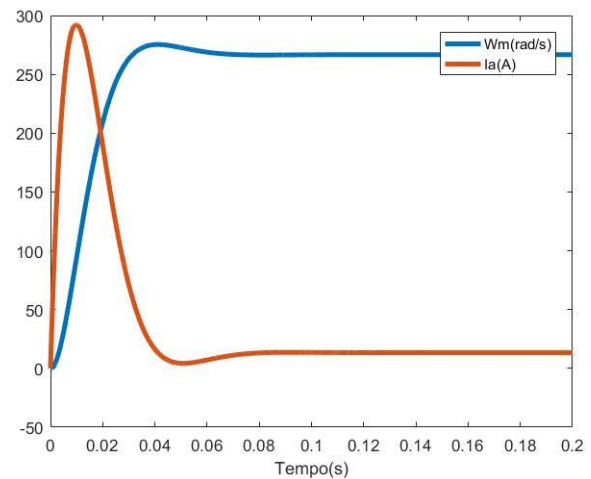


Fig. 3. Comportamento sem regulação de velocidade ou corrente.

Percebe-se que no momento de acionamento, a corrente atinge um pico muito elevado, em quase 300A, o que não é nada vantajoso. Com a adição do conjugado resistivo tem-se também a redução na velocidade de rotação do motor, quando comparada para $T_L = 0$. Para este modelo tal conjugado é constante desde o momento do acionamento.

Para então se obter melhores respostas, se utilizam controladores. O controle em si designa em essência a ação de fazer com que um sistema físico atenda as certas especificações de desempenho desejadas.

Existem três requisitos básicos que fazem parte da análise de um projeto de sistema de controle: estabilidade, resposta transitória e erros em regime permanente [7].

Dentre os três, a estabilidade é a especificação mais

importante, pois caso um sistema seja instável, a resposta transitória e os erros em regime permanente são uma questão irrelevante, pois a instabilidade impossibilita qualquer projeto de atender a determinadas especificações desejadas, ou seja, de ser útil [7].

De uma forma mais ampla, uma definição bastante empregada na literatura é de que um sistema é estável se toda entrada limitada gerar uma saída limitada. Uma dos critérios mais utilizados para análise de estabilidade é o de *Routh-Hurwitz* [7].



Fig. 4. Critérios para análise da resposta de um sistema

Para manipular a saída, seja modificando a resposta transitória quanto diminuindo o erro em regime permanente, se utilizam os controladores.

O controlador PI tem o intuito de melhorar o erro em regime permanente acrescentando um polo em malha aberta na origem, aumentando assim o grau do sistema por um, e para compensar a contribuição angular de tal polo, um zero é adicionado muito próximo a origem, deixando assim o sistema balanceado [8].

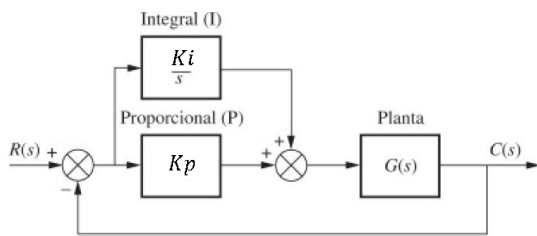


Fig. 5. Representação esquemática de um controlador PI.

Colocando dois controladores PI, um na malha interna do motor CC para regulação de corrente, já ajustado de modo que para um determinado valor de velocidade de referência, a corrente de armadura não ultrapasse seu valor nominal. O outro PI foi colocado na malha externa para regulação de velocidade, e utilizando o SIMULINK®, um novo modelo de motor CC fora gerado, conforme a Fig. 6.

TABELA 2
PARÂMETROS

Símbolo	Variável	Valor
K_{ic}	ganho integral do regulador de corrente	100
K_{pc}	ganho proporcional do regulador de corrente	22
Vel_{ref}	velocidade de referência	100 rad/s
I_{ref}	corrente de armadura de referência	10A
W_m	velocidade na saída do motor	$\cong 100 \text{ rad/s}$
I_{ev}	Integral do módulo do erro	Depende dos ganhos do regulador de velocidade

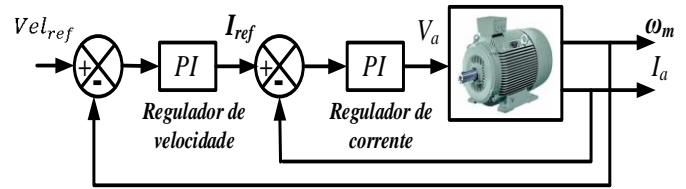


Fig. 6. Motor CC com regulação de velocidade e corrente

O que se deseja então analisar é o quanto os valores dos ganhos do regulador de velocidade influenciam no distanciamento entre a resposta da velocidade de saída do motor sua velocidade de referência. Para quantificar isso, se utilizou a função de Integral do módulo do erro (I_{ev}) entre as duas curvas. Para manter o valor da corrente de referência em 10A no regime permanente, se faz necessário limitar o ganho proporcional do PI de velocidade em $K_p \leq 0,1$. E para manter a velocidade de rotação em 100 rad/s, o ganho integral em $K_i \leq 1$.

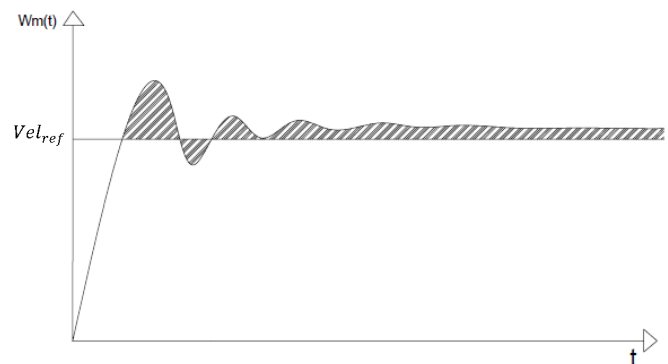


Fig. 7. Representação gráfica do módulo da integral do erro.

O seu cálculo de I_{ev} se dá pela seguinte forma:

$$I_{ev} = \int_0^t |(W_m(t) - Vel_{ref})| dt \quad (2)$$

Dessa forma, essa é a função que se pretende minimizar, modificando os ganhos proporcional e integral do controlador de velocidade, e para isso se utilizará a metodologia do *Simulated Annealing*.

III. MÉTODOS HEURÍSTICOS

Pode-se definir o espaço de busca como o conjunto de todas as possíveis soluções para um problema. Diz que a solução de um determinado problema pode se encontrar num conjunto de pontos onde a função $f: U \rightarrow R$ tem valores de máximo ou mínimo (problemas de máximo e mínimo estão intimamente relacionados, uma vez que problemas de máximo podem se tornar problemas de mínimo e vice versa, através do simples artifício de multiplicar a função por -1) [10].

Um espaço de busca pode assumir diversas formas, pode ser contínuo ou discreto, finito ou infinito, e isso determina qual aplicação de método se faz mais eficiente.

Pesquisa local é uma das técnicas mais eficientes para solucionar problemas de otimização e é a base para a maioria dos métodos heurísticos. Esse tipo de abordagem foi muito utilizada a partir da década de 1960 para enfrentar problemas de difíceis soluções [10]. O grande problema reside no fato de que em muitos casos esse tipo de metodologia pode acabar vindo a ficar presa em máximos ou mínimos locais. A parte da escolha de vizinhança é o fator mais crítico para o sucesso de qualquer tipo de pesquisa local.

Dentro do problema tratado nesse artigo, como já fora dito anteriormente, vamos em um primeiro momento limitar o espaço de busca para os ganhos, objetivando com que velocidade e corrente de armadura não ultrapassem os valores nominais, sendo assim:

$$0 < K_i \leq 1 \quad (3)$$

$$0 < K_p \leq 0,1 \quad (4)$$

Existem três métodos para pesquisar nesses espaços: numéricos, enumerativos e métodos probabilísticos [10]. Os métodos numéricos são muito utilizados e apresentam soluções exatas em uma ampla gama de problemas, entretanto eles não se mostram muito eficientes na otimização de funções *multimodais* (funções que apresentam vários pontos de máximo ou mínimo) [10]. Já os métodos enumerativos fazem uma busca examinando cada ponto do espaço de busca, um a um; ideia essa que em um primeiro momento pode ser bastante intuitiva, porém em problemas com um número muito elevado ou infinito de soluções possíveis, tal opção não é viável. Dessa forma, o *Simulated Annealing* se enquadra nos métodos probabilísticos, que como o próprio nome já faz alusão, utiliza a ideia de uma busca probabilística [11].

E assim como as diversas meta-heurísticas já citadas, o *Simulated Annealing* é um técnica que procura boas (próximas à ótima) soluções a um razoável custo computacional [12]. Dessa forma existem dois parâmetros básicos que guiam o *Simulated Annealing*: a qualidade da solução gerada e o esforço computacional necessário. E é exatamente a busca por alinhar ambas características inversamente proporcionais, que eclode o interesse neste campo de estudo.

Quando se tem um número muito elevado de possíveis soluções para um problema, heurísticas surgem de modo a ter o papel de reduzir o número de possibilidades e obter uma solução a tempo razoável. E também, esses métodos costumam

ser mais simples que os métodos exatos de solução, permitindo então abordam de maneira mais fácil modelos mais complexos.

IV. SIMULATED ANNEALING

O *Simulated annealing* foi desenvolvido por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi em 1983 [13] e de modo independente por Cerny em 1985 [14], utilizando o algoritmo Metropolis de 1953 [15]. Ele é uma técnica de busca estocástica na qual uma solução potencial é gerada de forma randômica, S' , para um certo problema, e é comparada com uma solução existente, S . A probabilidade de S' ser aceito para a investigação depende da proximidade entre $f(S)$ e $f(S')$. Se S' for aceito, sua adequação como solução é avaliada de acordo com um função de probabilidade de troca. As funções de aceitação e probabilidade de troca dependem de um parâmetro de temperatura T [16], que reduz seu valor a medida que o algoritmo prossegue. No contexto deste trabalho, S e S' representam possíveis valores para os ganhos K_i e K_p .

$$S = [K_i, K_p]$$

$$S' = [K_i', K_p']$$

O método vem de uma analogia física, onde *annealing* significa recozimento e pode ser entendido como um processo no qual um sólido é aquecido até seu ponto de fusão e logo em seguida é resfriado gradual e vagarosamente, até que alcance novamente seu enrijecimento. Nesse processo, o resfriamento lento é essencial para se manter o equilíbrio térmico no qual os átomos encontrarão tempo suficiente para se reorganizarem em uma estrutura uniforme [17].

Toda a motivação do *Simulated annealing* teve sua origem na física estatística, que está relacionada essencialmente ao emprego de métodos da teoria de probabilidade e estatística, para lidar com grandes populações, e assim também estudando as propriedades de agregação dos átomos presentes em substâncias em diversas formas, sejam elas sólidas ou líquidas. Uma questão fundamental é: o que acontece quando um sistema tem sua temperatura reduzida ao extremo? Como já fora dito, a forma com que esse resfriamento acontece é de suma importância, pois pode fazer com que o sistema atinja o que é chamado por estado mínimo de energia. Caso a temperatura seja reduzida de forma muito grosseira, o que acontecerá é que o sólido vá para um estado irregular e de estrutura fraca.

Na fase líquida todas as partículas do sólido arranjam-se aleatoriamente. No estado de baixa energia, as partículas formam um arranjo altamente estruturado conhecido como cristal, onde a energia do sistema é mínima. O estado fundamental do sólido somente é obtido se a temperatura máxima for suficientemente alta e o resfriamento for feito suficientemente lento.

A base matemática do *annealing* vem a partir da Distribuição de Boltzmann, que é definida por:

$$P_i = \frac{1}{N_0} e^{-\frac{E_i}{kT}}, \forall i \in S \quad (5)$$

Pode-se considerar um sistema termodinamicamente grande, em uma temperatura fixa T . Dentro disso, o sistema pode possuir i estados possíveis, cada qual com uma energia E_i associada. N_0 representa uma constante normalizadora e k a constante de Boltzmann. E P_i permite calcular a probabilidade com que o sistema ocupe um estado i de energia.

Baseado nisso, fora introduzido um algoritmo simples, no qual segundo eles, quando os átomos se encontram em equilíbrio, a probabilidade de que a energia de um sistema seja E , é proporcional a $e^{-\frac{E}{kT}}$ [15].

Dessa forma, a probabilidade de que a energia de um sistema seja $(E+dE)$ pode ser expressa por:

$$prob(E + dE) = prob(E) e^{-dE/kT} \quad (6)$$

Então a probabilidade de que a energia passe de E para $(E+dE)$ é proporcional a $e^{-dE/kT}$. Onde:

$$dE = E_{i+1} - E_i \quad (7)$$

Sendo assim, conseqüentemente aferimos que a medida que a temperatura de um sistema vai reduzindo, a probabilidade dele mudar seus estados de energia também reduz, até o ponto que essa probabilidade tende a zero, chegando assim no estado mínimo de energia.

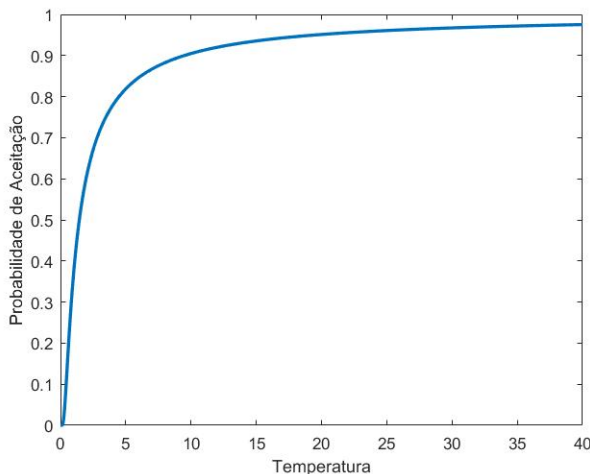


Fig. 8. Comportamento da probabilidade de aceitação em função da temperatura

O *Simulated annealing*, diferente de outros métodos, oferece uma forma de escapar de ótimos locais, avaliando a vizinhança da solução corrente aceitando novas soluções mesmo que estas ofereçam pioras a solução corrente, com uma probabilidade que é menor quanto maior for a distância entre essa solução e a solução corrente. A condição para aceitar ou rejeitar um movimento que aumente a função custo (ou seja, solução pior) é determinado por uma sequência de números randômicos, mas com uma probabilidade controlada, dada por $e^{-\Delta/T}$, onde Δ representa a diferença entre as soluções e T é um parâmetro de controle, que corresponde a temperatura, fazendo alusão ao processo físico. Ou seja, essa função custo nos diz que quanto maior for a distância entre as soluções menor é a probabilidade

de aceite e quanto menor for a temperatura o mesmo também acontece.

Desta forma, o algoritmo se inicia com altos valores de temperatura T , de modo que ele não fique permanentemente preso em algum mínimo local. O algoritmo então prossegue fazendo vários movimentos na vizinhança e cada temperatura, antes de reduzi-la.

O *Simulated Annealing* pode ser visto como um processo estocástico de determinação de uma organização dos átomos de um sólido, que apresente energia mínima. Em altas temperaturas, os átomos se movem livremente e, com grande probabilidade, podem mover-se para posições que incrementarão a energia total do sistema. Quando a energia se abaixa, os átomos gradualmente se movem em direção a uma estrutura regular e cada vez com uma menor probabilidade, incrementarão suas energias [9].

Dessa forma, pode-se assumir uma analogia entre um sistema físico de partículas e um problema de otimização:

- Soluções de problemas de otimização são equivalentes a estados de sistemas físicos.
- O custo de uma solução é equivalente a energia de um estado.
- A seleção de uma solução vizinha em um problema de otimização é equivalente à perturbação de um estado físico.
- O ótimo global de um problema combinatório é equivalente ao estado fundamental de um sistema de partículas.
- Um ótimo local é equivalente a resfriamento rápido no sistema físico.

Através então dessas analogias que se alicerça a ideia do *Simulated Annealing*.

Como no caso deste trabalho em particular, a função que se deseja minimizar é o módulo da integral do erro (I_{ev}) através das soluções K_i e K_p . Nessas condições define-se:

$$\Delta = \frac{I_{ev}(S') - I_{ev}(S)}{I_{ev}(S)} \quad (8)$$

Devido aos valores elevados que o Integral do módulo do erro pode assumir, fora adotado uma variação energética em termos percentuais. Além disso, para evitar flutuações muito grandes na probabilidade de aceitação por conta de Δ , e respeitar a ideia de busca de vizinhança, seu valor fora limitado a $\Delta \leq 4$, representando uma variação de 400% ao redor de $I_{ev}(S)$.

No caso de $\Delta \leq 0$, a solução S' será aceita como a nova solução corrente, pois estamos procurando uma solução de mínimo global. Caso contrário, uma nova solução somente será aceita se:

$$g(\Delta, T) > random(0,1) \quad (9)$$

Onde:

$$g(\Delta, T) = e^{-\frac{\Delta}{T}} \quad (10)$$

Assim o processo ocorre iterativamente, diminuindo a temperatura lentamente e procurando novas soluções. Na Fig.8 tem-se uma síntese do método com um pseudo-código.

Procedimento *Simulated Annealing*, onde $S = [Kp, Ki]$:

Início

$S^* \leftarrow S$

$iter \leftarrow 0$

$T \leftarrow T_0$

$N \leftarrow N_0$

Enquanto $T > \text{Tolerância}$

Enquanto ($iter < N$)

$iter \leftarrow iter + 1$

Gerar um vizinho S' *aleatoriamente na vizinhança de* S .

$\Delta = f(S') - f(S)$

se $\Delta < 0$ *então*:

$S \leftarrow S'$

se ($f(S') < f(S^*)$) *então* $S^* \leftarrow S'$

senão

tome $x \in [0,1]$

se $x < e^{-\Delta/T}$ *então*:

$S = S'$

fim-se

$T = T \times \alpha$

$iter = 0$

fim- enquanto

Retorne S^*

Fim-procedimento

Fig 9. Pseudo-código do *Simulated Annealing*

O algoritmo fora estruturado, de modo que a solução corrente, denotada por S , fosse sendo continuamente modificada conforme os requisitos de probabilidade de aceitação já explorados. Os novos valores, candidatos à solução corrente, S' , são gerados sempre de uma forma randômica dentro do espaço de busca limitado pelo problema. Sendo assim, como para valores elevados de T , o *Simulated Annealing* permite uma piora das soluções, de modo a fugir de mínimos locais, pode acontecer que uma solução de mínimo global, seja encontrada em um estágio muito inicial da simulação, sendo assim substituída por outra, na finalidade de abranger um leque maior de possibilidades.

Para então, fugir desse problema, uma variável denotada por S^* , tem a específica função de armazenar o melhor resultado global, mesmo que a solução S esteja testando novos ganhos. O

algoritmo deve ao final da simulação, ter encontrado valores finais de S e S^* muito próximos

V. AJUSTES DE PARÂMETROS

Primeiro cabe salientar que dentro da literatura T_0 é determinado de diversas maneiras, sendo algumas vezes atribuídos valores aleatórios do quais seguem a única necessidade de serem suficientemente altos, para que um maior número de possíveis soluções possam ser exploradas [18].

Neste trabalho, fora definido que a temperatura inicial fosse ajustada analisando a função $g(\Delta, T)$, onde ela possui seu comportamento ilustrado na Fig. 8, dessa forma queremos uma probabilidade de aceitação inicial elevada, com $p_0 = 98\%$. Para encontrar então a temperatura inicial, se utilizou de $\Delta_{máx} = 400\%$. Partindo dessas condições, necessita-se de uma temperatura inicial próximo a $T_0 = 200K$.

Outro ponto relacionado a temperatura, é a maneira pela qual ela é reduzida, e para isso dá-se o nome de *fator de resfriamento* α . E tal fator de multiplicação é fixo e menor que 1.

$$T_{k+1} = \alpha T_k \quad (11)$$

A temperatura deve ser reduzida lentamente, e o valor de α usualmente selecionado entre 0,8 e 0,99 com tendências a valores mais próximos de 1, dando assim uma redução mais lenta. O valor de α influi diretamente no tempo de execução do algoritmo e na qualidade das soluções, uma vez que quanto mais baixo α , maior a velocidade de execução, porém maior possibilidade das soluções finais não serem tão boas quanto deseja-se [9].

Dessa forma, será executado o algoritmo para dois valores de α , um abaixo das recomendações para valores usuais o outro com um resfriamento mais lento.

$$\alpha_1 = 0,6 \quad (12)$$

$$\alpha_2 = 0,95 \quad (13)$$

Outro parâmetro que aparece no pseudo-código da Fig. 9, é a variável N , que é relativo ao número de soluções testadas dentro de uma mesma temperatura. Ou seja, dada uma temperatura T , fixa, existem diversas possibilidades energéticas dentro dela, estados diferentes que precisam ser explorados. Normalmente, em problemas da literatura, esse valor é ajustado mediante a complexidade do problema. Sendo assim, será explorado também dois casos diferentes para os valores de N .

$$N_1 = 1 \quad (14)$$

$$N_2 = 4 \quad (15)$$

A *Tolerância* do sistema faz referência a um valor definido de modo a controlar até quão baixo deseja-se atingir a temperatura T [19]. Fora então definida como:

$$\text{Tolerância} = 0,01 \quad (16)$$

Tal valor não precisa ser tão baixo, uma vez que a função $e^{-\frac{1}{x}}$ decresce muito rapidamente para valores pequenos de x . E se tornaria assim um desperdício de tempo/iterações.

VI. RESULTADOS

Para todas as simulações considerou um tempo de execução de $t=4s$, na temperatura $T=200K$ e mantendo a restrição de um $\Delta < 4$.

Primeiramente, obtem-se os resultados para uma simulação considerando $N_1 = 1$ e $\alpha_1 = 0,6$. Para tal configuração obteve-se um número de 20 iterações satisfazendo a restrição de Δ .

Como pode-se perceber fora realizado um número muito baixo de iterações, encontrando o seguintes resultados:

TABELA III
COMPATIVO DE GANHOS 1 (N=1 E $\alpha = 0,6$)

S* (Solução ótima global)	S (Solução final encontrada)
$Ki^*=0,5523$	$Ki=0,3981$
$Kp^*=0,0979$	$Kp=0,0857$
$Iev^*=37,2241$	$Iev=47,2714$

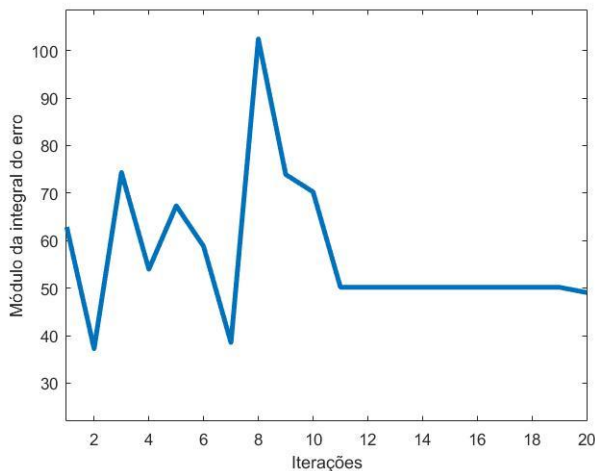


Fig. 9. Integral do módulo do erro para $N=1$ e $\alpha = 0,6$

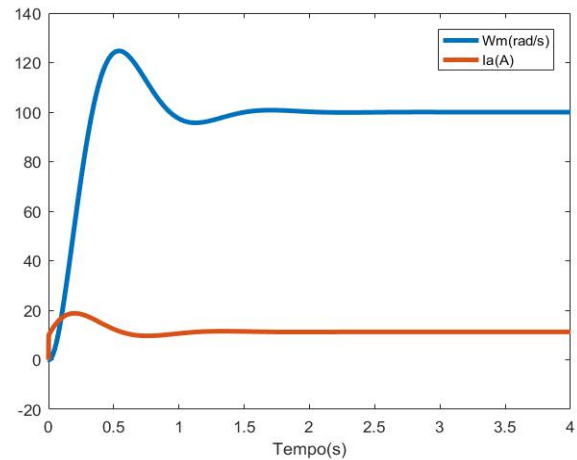


Fig. 10. Resposta de velocidade e corrente de armadura para $N=1$ e $\alpha = 0,6$ para a solução ótima.

Como pode-se perceber, o número muito baixo de iterações e um resfriamento também baixo, fez com que o programa caísse em um mínimo local e não teve tempo suficiente para encontrar uma solução melhor. Tal comportamento é principalmente característico de uma função de resfriamento muito baixa. Com relação aos ganhos; Kp se mostrou satisfatório uma vez que espera-se que o mesmo atinja 0,1; enquanto isso, Ki deveria se aproximar de 1, o que não ocorreu.

Agora mantendo $\alpha_1 = 0,6$, alterando N para 4, tem-se um total de 72 iterações com:

TABELA IV
COMPATIVO DE GANHOS 2 (N=4 E $\alpha = 0,6$)

S* (Solução ótima global)	S (Solução final encontrada)
$Ki^*=0,9718$	$Ki=0,9454$
$Kp^*=0,0988$	$Kp=0,0972$
$Iev^*=29,7642$	$Iev=30,4089$

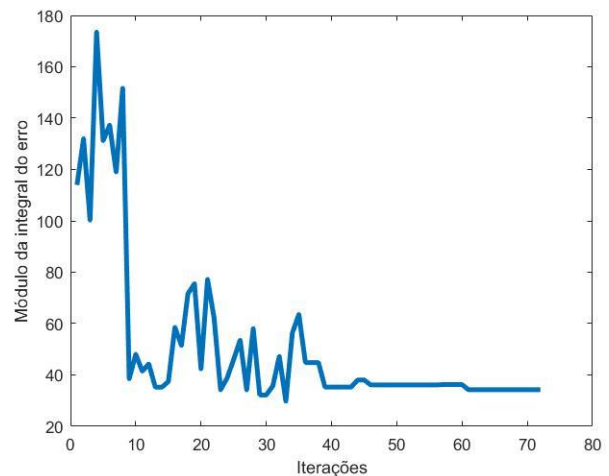


Fig. 11. Integral do módulo do erro para $N=4$ e $\alpha = 0,6$

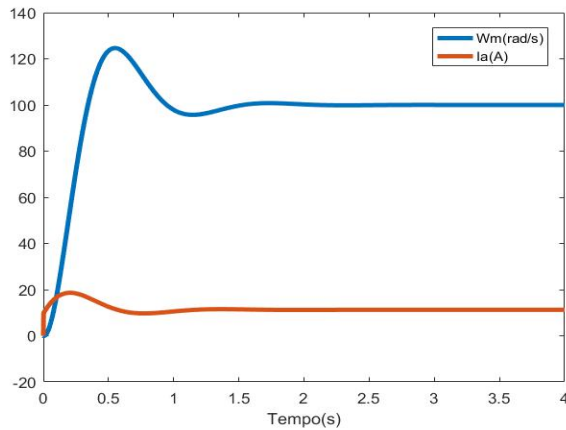


Fig. 12. Resposta de velocidade e corrente de armadura para $N=4$ e $\alpha = 0,6$

Aumentando o número de iterações, já tem-se um resultado mais satisfatório quando comparado ao anterior, principalmente no que tange a qualidade dos ganhos, em especial de K_i , pois o mesmo já se aproximou bastante de 1. Percebe-se que ainda o algoritmo caiu em um mínimo local, pela diferença entre solução ótima e a solução final encontrada.

Para as respostas de velocidade e corrente de armadura em função do tempo de simulação, pode-se perceber melhor a variação quando as curvas estão sobrepostas.

Desse modo, como vê-se na Fig. 13, com um valor para $K_i=0,5523$, a resposta da velocidade se mostrou significativamente mais lenta, e apresentando um maior erro quando comparado a velocidade de referência. Enquanto isso, a corrente de armadura para $K_i=0,9718$, atingiu um pico mais elevado.

Deste modo, viu-se que com o aumento do número de buscas dentro de uma mesma temperatura, ocorreu uma diminuição na função que deseja-se minimizar, I_{ev} , porém com um custo de uma corrente de armadura de pico superior.

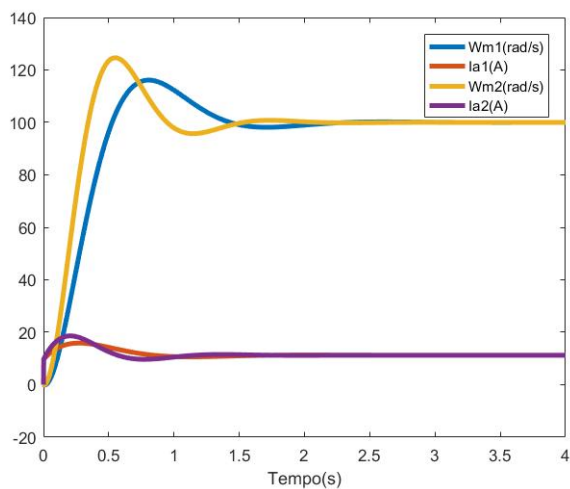


Fig. 13. Comparação das respostas de velocidade e corrente.

Se o valor de N retornar para 1, e se aumentar α para $\alpha_2 = 0,95$. Tem-se um número de 180 iterações com os resultados:

TABELA V
COMPATIVO DE GANHOS 3 ($N=1$ E $\alpha = 0,95$)

S^* (Solução ótima global)	S (Solução final encontrada)
$K_i^*=0,9529$	$K_i=0,9319$
$K_p^*=0,0973$	$K_p=0,0965$
$I_{ev}^*=30,3546$	$I_{ev}=30,5556$

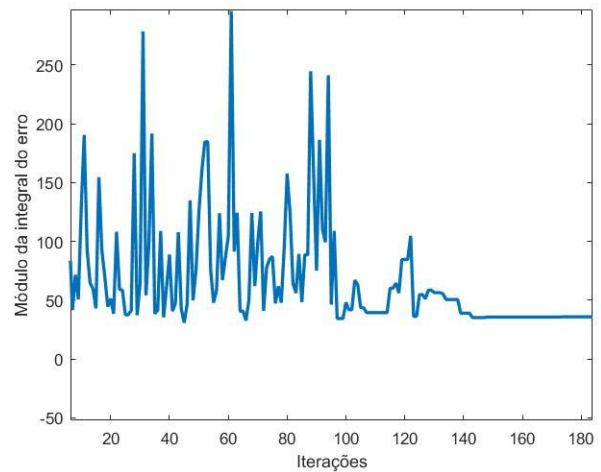


Fig. 14. Integral do módulo do erro para $N=1$ e $\alpha = 0,95$

Com tal alteração, o valor do Integral do módulo do erro teve uma ligeira deteriorização de 1,98%, uma variação que pode ser explicada como dentro do normal, visto que é um processo iterativo e sempre existe uma determinada faixa de erro esperada.

Pode-se inferir que o fator de descrescimento está obviamente relacionado à qualidade da solução, porém está mais ainda associado com a questão do algoritmo não se perder tanto em ótimos locais como aconteceu anteriormente.

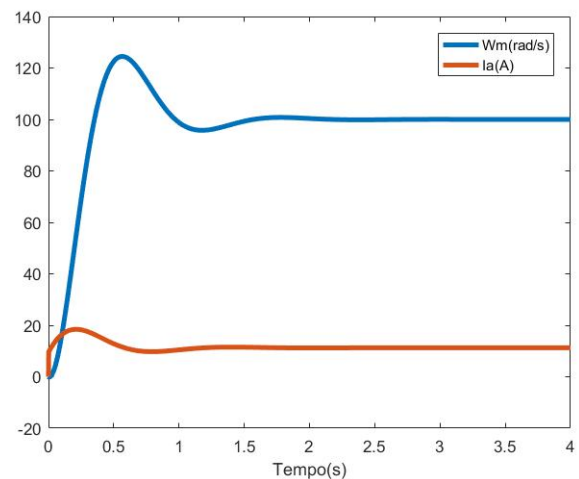


Fig. 15. Resposta de velocidade e corrente de armadura para $N=1$ e $\alpha = 0,95$

Considerando então os parâmetros como os mais elevados para $N=4$ e $\alpha = 0,95$ foram realizada 717 iterações.

TABELA VI
COMPATIVO DE GANHOS 4 ($N=4$ e $\alpha = 0,95$)

S^* (Solução ótima global)	S (Solução final encontrada)
$Ki^*=0,9789$	$Ki=0,9702$
$Kp^*=0,0998$	$Kp=0,0981$
$I_{ev}^*=29,4525$	$I_{ev}=29,5781$

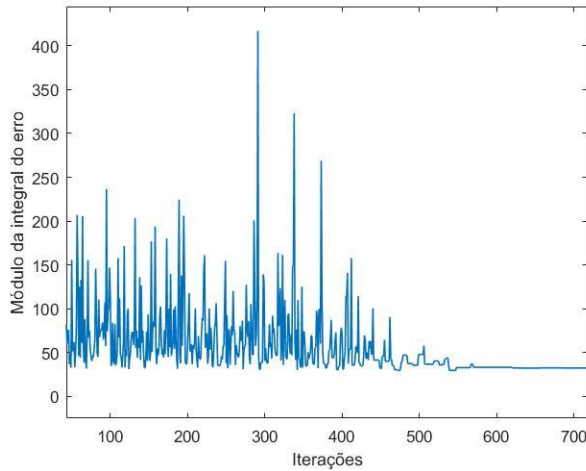


Fig. 16. Integral do módulo do erro para $N=1$ e $\alpha = 0,95$

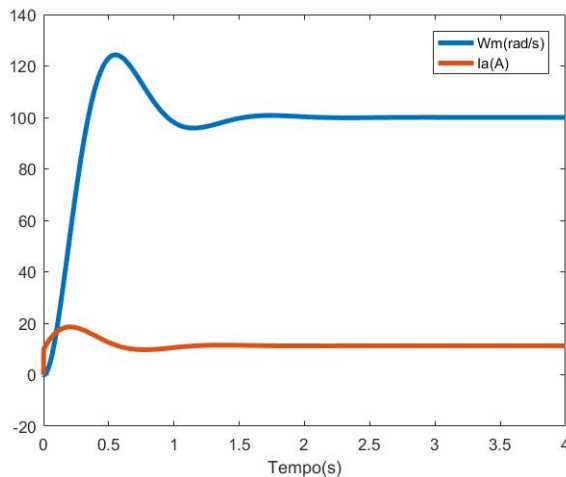


Fig. 17. Resposta de velocidade e corrente de armadura para $N=4$ e $\alpha = 0,95$

Com a variação nos parâmetros, como esperado, o que mais se aproximou foi o caso 4, conforme a tabela VI.

Comparando as respostas de velocidade e corrente de armadura para $\alpha = 0,95$, com as variações para os valores de N , tem-se:

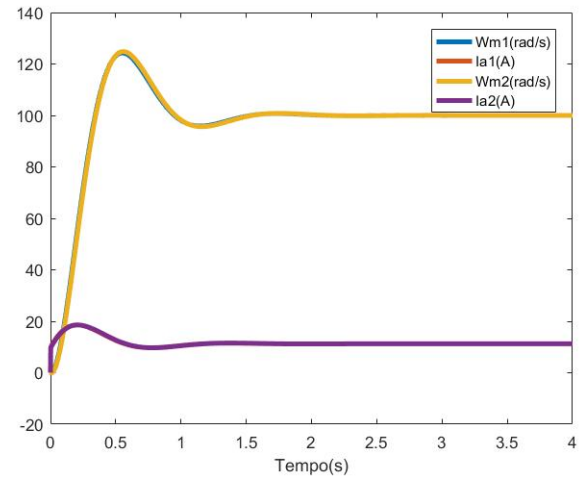


Fig. 18. Comparação das respostas de velocidade e corrente.

Mantendo α próximo de 1, mesmo com a alteração nos valores N , as curvas de velocidade e corrente estão praticamente sobrepostas, sendo extremamente sutil a diferença.

Desta forma um ponto muito importante a se aferir destes testes, como esperado, é de que quanto maior os valores dos ganhos Ki e Kp , menor é o valor do módulo da integral. Inicialmente, os ganhos foram limitados respectivamente para atender as especificações nominais de velocidade e corrente. Porém, como fora percebido, mas a Fig. 19 ilustra também, é que quanto maior os ganhos, menor é também o Integral do módulo do erro, porém isso tem um custo de fazer a corrente de armadura atingir valores muito elevados. Portanto cabe ressaltar, que ao se analisar somente a minimização de I_{ev} , os ganhos tenderão sempre a valores mais altos, encontrando o teto dos limites.

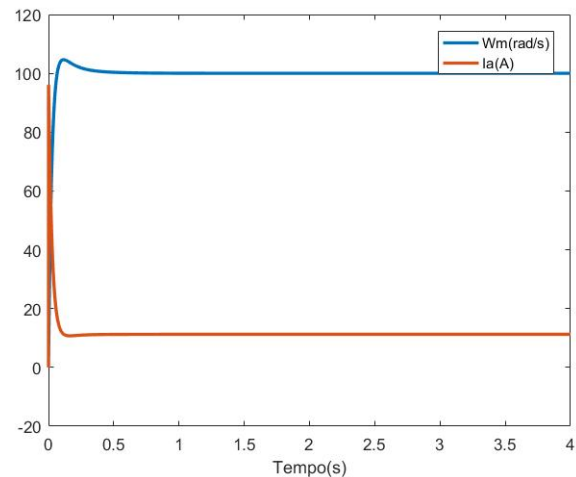


Fig. 19. Resposta de velocidade e corrente de armadura para $Ki=10$ e $Kp=1$

Conforme a Fig. 19, para um ganho proporcional $Kp=1$, a corrente de armadura tem um pico de aproximadamente 100A, sendo assim completamente inviável mesmo que o Integral do módulo do erro de velocidade tenha sido $I_{ev}=2,8960$.

Contudo, mostrou-se então que o Simulated Annealing foi capaz de caminhar rumo as respostas com o menor valor para I_{ev} . Para fazer mais uma verificação no funcionamento do algoritmo, pode-se então considerar uma forma de resolver o problema do pico de corrente.

Uma alternativa para se realizar tal análise é colocando um saturador na saída do regulador de velocidade, limitando assim a corrente de armadura em um valor desejado. Como em regime permanente quer-se $I_a=10A$, vai se admitir um pico de corrente de no máximo 15A. Esse será o papel do saturador, garantir tal especificação.

Com isso a modelagem do motor CC no ambiente SIMULINK® fica conforme a Fig. 20.

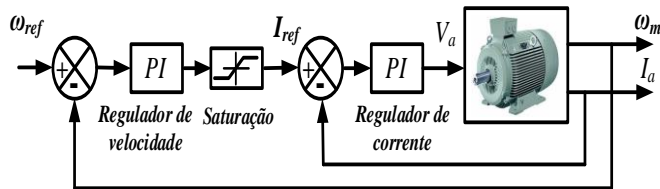


Fig. 20. Modelagem do motor CC com o incremento de saturador para restrição da corrente de armadura

Uma característica importante de se ressaltar, a partir do momento que se trabalha com saturadores é a não-linearidade.

Na realidade, todos os sistemas reais possuem algumas restrições, ou seja, possuem limites práticos tanto para os valores de entrada quanto de saída.

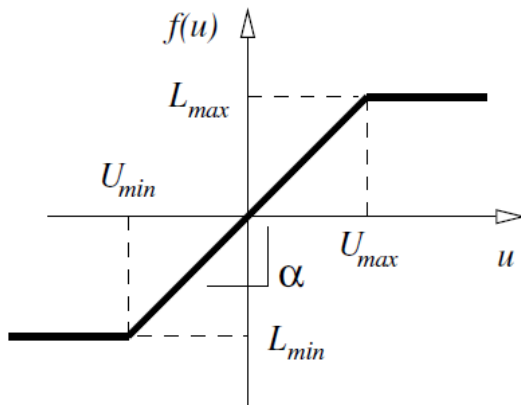


Fig. 21. Representação gráfica do funcionamento de um saturador.

Sendo na Fig. 21 representado o modelo de representação gráfica de um saturador. Com a inserção do mesmo no modelo do motor, tem-se que os ganhos do controlador PI de velocidade, já não podem mais ser determinados através das técnicas de controle convencionais da literatura. Agora o problema passa a ser da alçada de Sistemas Dinâmicos não lineares. Partindo disso, o *simulated annealing* tais como outros métodos de otimização são excelentes candidatos e de de então fundamental importância para a resolução de problemas dessa natureza.

Portanto, aplicando o *simulated annealing* no novo modelo do motor CC, considerando o fator de resfriamento, o valor para N e os limites do saturador para a corrente iguais à:

$$\alpha = 0,95 \quad (17)$$

$$N = 4 \quad (18)$$

$$\text{Saturação: } -15 \leq I_a \leq 15 \quad (19)$$

Mantendo-se todos os outros parâmetros já anteriormente utilizados, obteve-se um total de 749 iterações

TABELA VII
COMPATIVOS DE GANHOS 5 ($N=4$ E $\alpha = 0,95$ E COM SATURADOR)

S* (Solução ótima global)	S (Solução final encontrada)
$K_i^*=0,4143$	$K_i=0,3458$
$K_p^*=0,0984$	$K_p=0,0903$
$I_{ev}^*=48,0224$	$I_{ev}=50,1131$

Pode-se perceber que houve uma diferença de 4.35% entre a solução ótima geral e a última solução encontrada. Outro ponto é de que o valor do ganho integral, não chegou ao limite do nosso espaço de busca (que seria próximo a 1).

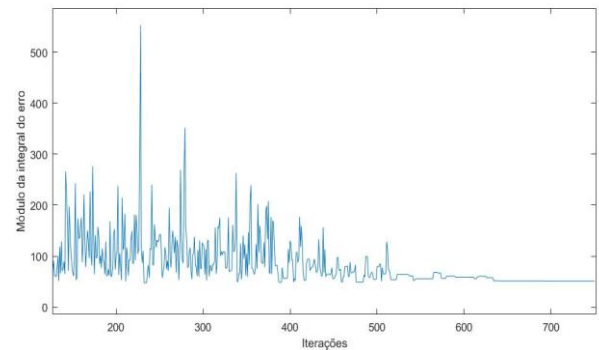


Fig. 22. Integral do módulo do erro para $N=4$ e $\alpha = 0,95$ e com um saturador

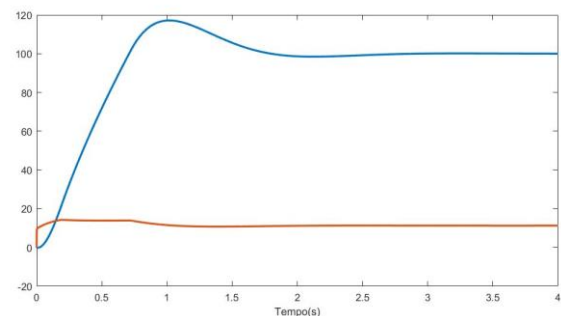


Fig. 23. Resposta de velocidade e corrente com $N=4$ e $\alpha = 0,95$ e com um saturador

Para as respostas de velocidade e corrente com o saturador, ocorreu o que era esperado; os ganhos foram obtidos de modo com que o máximo valor de corrente de armadura não ultrapassasse 15A, sendo perceptível na Fig. 23 tal retificação durante o seu regime transitório.

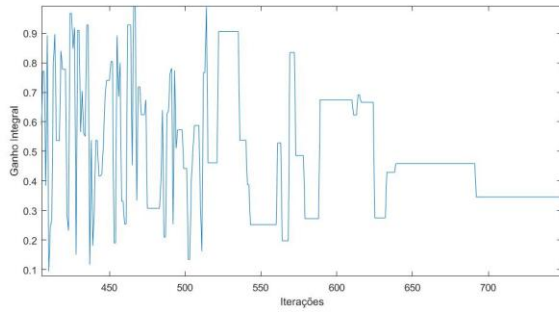


Fig. 24. Valores de ganhos integrais analisados

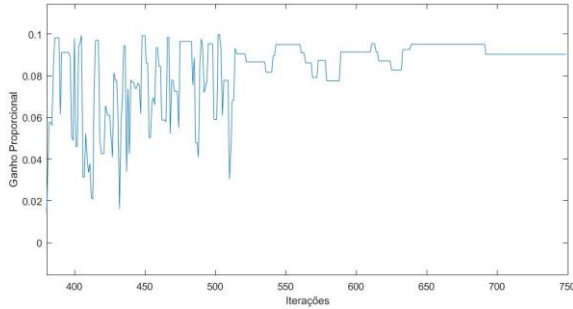


Fig. 25. Valores de ganhos proporcionais analisados

Nas figuras 24 e 25, tem-se a evolução dos ganhos a medida que as iterações são realizadas.

São ilustradas nas figuras 26 e 27 as variáveis responsáveis por armazenar as soluções ótimas, o que já fora denotado por S^* , o que se observa é que apesar de terem sido realizadas 749 iterações, a partir da iteração 250, um ótimo global já fora atingido.

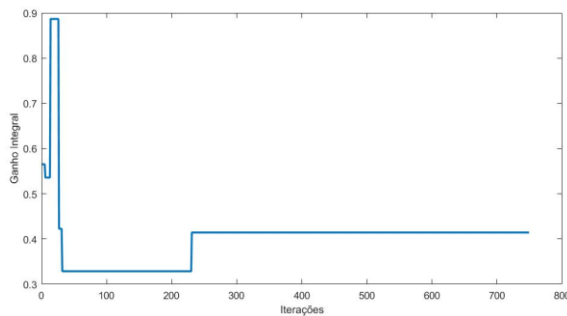


Fig. 26. Valores ótimo para o ganho integral

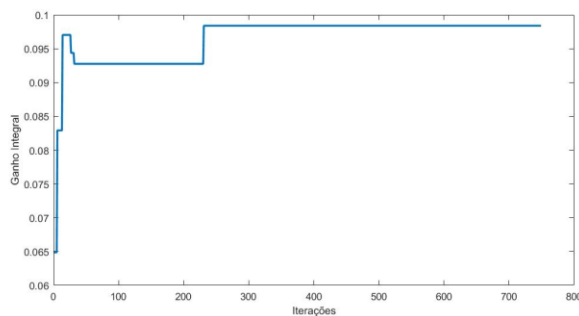


Fig. 27. Valores ótimo para o ganho proporcional.

Dessa forma, através de tal análise se verifica que o algoritmo do *simulated annealing* também foi capaz de encontrar valores

satisfatórios para os ganhos integral e proporcional para o controlador de velocidade.

Há de se notar que em todos os casos analisados até aqui, limitou-se o espaço de busca dos ganhos no seguinte intervalo:

$$0 < K_i \leq 1 \quad (20)$$

$$0 < K_p \leq 0,1 \quad (21)$$

Sendo assim, para poder observar a potência e o quão eficaz o algoritmo do *simulated annealing* pode se mostrar, aumentou-se o espaço de busca significativamente para:

$$0 < K_i \leq 10 \quad (22)$$

$$0 < K_p \leq 0,1 \quad (23)$$

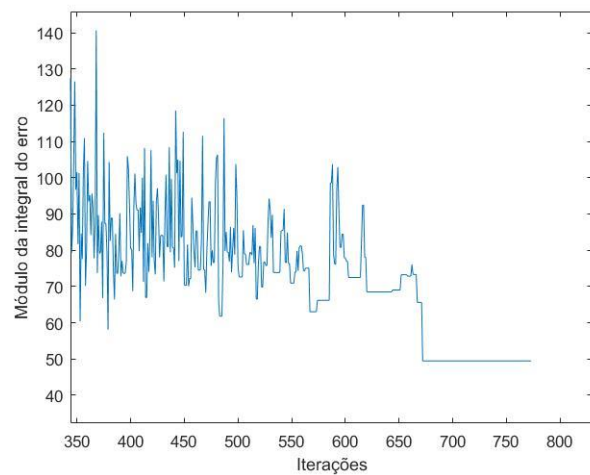
Mantendo-se $N=4$ e $\alpha = 0,95$, obteve-se um total de 773 iterações.

TABELA VIII
COMPATIVO DE GANHOS 5 ($N=4$ E $\alpha = 0,95$ E COM SATURADOR E AUMENTO NO ESPAÇO DE BUSCAS)

S^* (Solução ótima global)	S (Solução final encontrada)
$K_i^*=0,3918$	$K_i=0,3918$
$K_p^*=0,0946$	$K_p=0,0946$
$I_{ev}^*=49,4750$	$I_{ev}=49,4750$

Pode-se então perceber que apesar do aumento significativo do espaço de busca para o ganho integral, obteve-se uma resposta excelente, quando comparada ao intervalo 10 vezes menor.

Comparativamente, o erro com novo espaço de busca foi apenas 3,02% maior que o teste anterior. Um aumento irrisório tendo em vista o quão se alargou as possibilidades de soluções como respostas para o sistema.

Fig. 28. Integral do módulo do erro para $N=4$ e $\alpha = 0,95$, com saturador e espaço de busca aumentado.

O comportamento das respostas de velocidade do rotor e corrente de armadura, conforme a Fig. 29 se mantiveram

bastante próximas com o caso do espaço de busca reduzido para K_i .

Outro ponto que se cabe salientar é de que, nessa simulação a solução corrente coincidiu com a solução ótima, indicando que o resfriamento em $\alpha = 0,95$ fora suficiente para fugir de mínimos locais, este é o cenário ideal do *simulated annealing*.

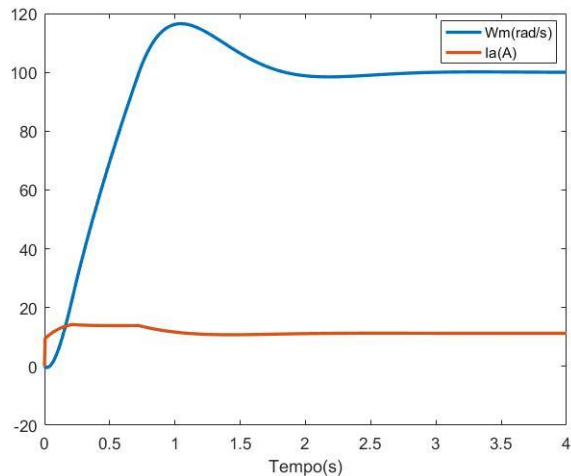


Fig. 29. Resposta de velocidade e corrente com $N=4$ e $\alpha = 0,95$ com saturador e espaço de busca aumentado.

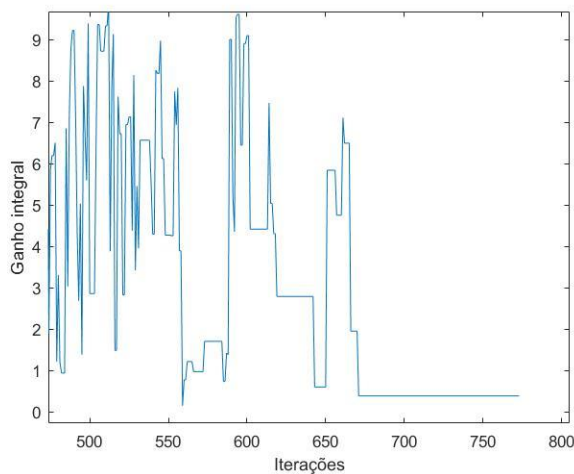


Fig. 30. Valores de ganhos integrais analisados

A partir da Fig. 30 vê-se o comportamento do algoritmo varrendo o espaço de busca atrás da melhor solução de modo a minimizar I_{ev} .

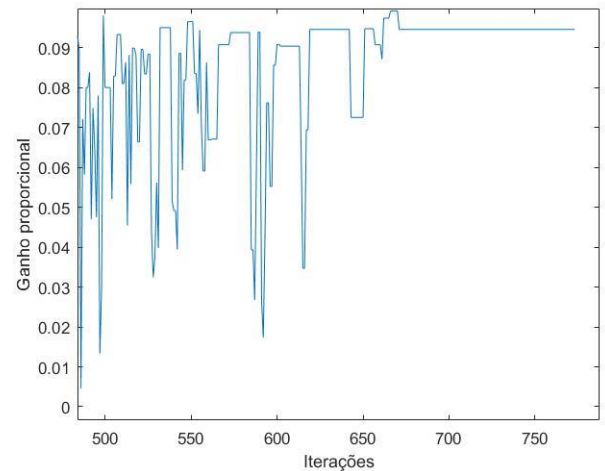


Fig. 31. Valores de ganhos proporcionais analisados

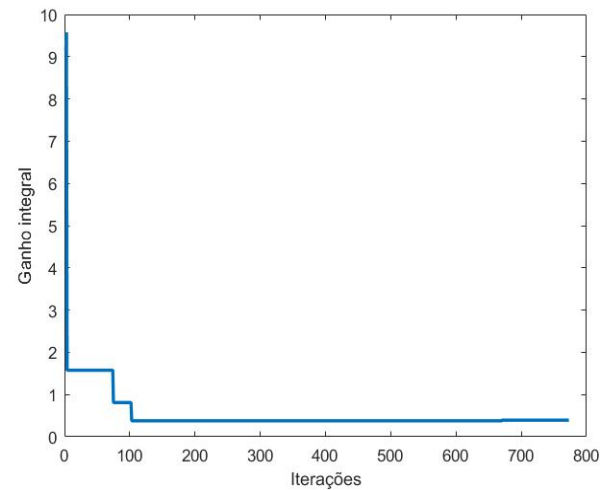


Fig. 32. Valores ótimo para o ganho integral

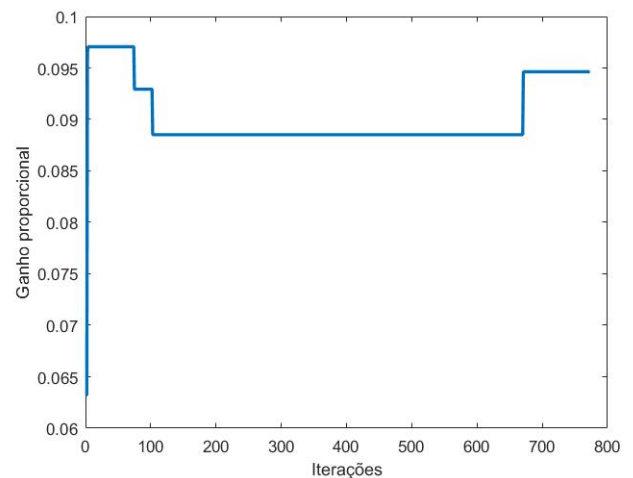


Fig. 33. Valores ótimo para o ganho proporcional

Vê-se que para essa última simulação, os ganhos ótimos obtidos foram definidos após um número muito elevado de iterações, diferentemente do que aconteceu na simulação anterior a ela. Tendo encontrado tais valores próximos à 700 iterações.

Fez um algoritmo auxiliar, para servir como um medidor da qualidade das soluções encontradas, visto que dentro da teoria de controle clássica, tal resultados não poderiam ser obtidos.

Definiu-se um número de pares ordenados (K_i, K_p) que foram gerados randômicamente dentro do intervalo:

$$0,6K_i^* < K_i \leq 1,4K_i^* \quad (24)$$

$$0,6K_p^* < K_p \leq 0,1 \quad (25)$$

O intervalo para o ganho integral foi definido dentro de uma margem elevada de $\pm 40\%$, o mesmo para o ganho proporcional, excetuando o limite superior, uma vez que fora fixado em 0,1 para que o sistema mantenha a corrente em 10A.

Então, com uma amostra de 100 pontos randômicos, calculou-se o Integral do módulo do erro de velocidade para esses pontos, onde apenas dois destes pares ordenados resultaram em valores de erros inferiores aos obtidos pelo *Simulated Annealing*. A Tabela IX apresenta os valores de ganhos que se mostraram melhores

TABELA IX
COMPATIVO DE GANHOS 5 ($N=4$ e $\alpha = 0,95$ /COM SATURADOR)

$S^*(K_i; K_p)$	I_{ev}
$(0,3730; 0,0973)$	47,4606
$(0,4003; 0,0989)$	47,2979
$(0,4371; 0,0996)$	48,1176

A Figura 34 ilustra o valor da função do Integral do módulo do erro ao longo das 100 amostras.

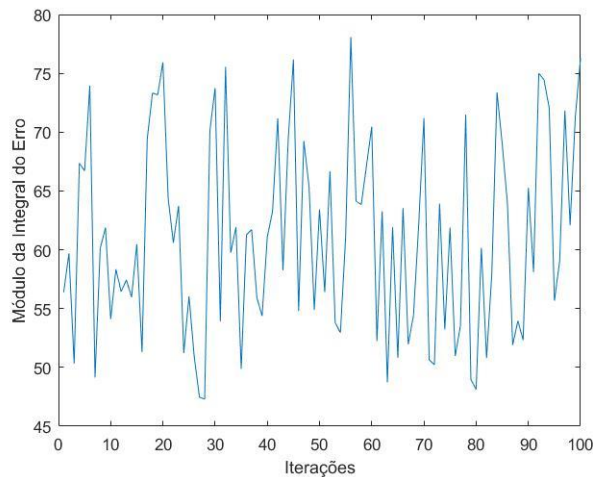


Fig. 34. Verificação da qualidade da solução encontrada pelo *Simulated Annealing*.

Consequentemente percebe-se que de todas as soluções testadas, para $K_i=0,4003$ e $K_p=0,0989$, obteve-se a condição de mínimo para a função estudada.

VII. CONCLUSÃO

Este trabalho propõe e apresentou a aplicação de um algoritmo utilizando o *Simulated Annealing*, um método estocástico de busca, que se baseia em uma fundamentação oriunda da termodinâmica. Fora investigada a potencialidade de tal método na solução de um problema criado dentro do escopo de sistemas de controle, para determinar os ganhos integral e proporcional de um controlador PI de velocidade, de modo a minimizar o Integral do módulo do erro entre a velocidade do rotor e sua velocidade de referência.

Devido sua vasta área de aplicabilidade, métodos de otimização despertam o interesse dos pesquisadores a vários séculos. O problema escolhido para ser aqui tratado, poderia ser facilmente substituído por algum semelhante, pois a ideia principal está no fato do *Simulated Annealing* ser capaz de otimizar o que lhe é proposto.

Nos dias de hoje observa-se uma forte tendência em se utilizar métodos aproximados na resolução desta classe de problemas. Uma abordagem dessa natureza, apesar de não garantir encontrar uma ótima solução para o problema, é capaz de oferecer uma solução de boa qualidade, em tempo de processamento aceitável, o que é perfeitamente considerado em muitas situações reais.

Em primeiro momento, utilizou-se um modelo de motor linear que possuía valores de velocidade e corrente de referência, onde tais ganhos poderiam ser obtidos via diversas técnicas e métodos já conhecidos, e citados, na teoria clássica de sistemas de controle.

Dessa forma, percebeu-se que conforme o esperado, o valor do Integral do módulo do erro se mostrou inversamente proporcional aos ganhos do controlador. Se fosse feito K_i e K_p de modo a seus valores tenderem a valores muito elevados, o Integral do módulo do erro tenderia a zero, porém isso resultaria em enormes distúrbios para a corrente de armadura.

Ou seja, durante o primeiro teste, as soluções ótimas já eram conhecidas, sendo elas o valor máximo admitido dentro de cada intervalo fixado. Ante isso, dois parâmetros internos, o número de soluções analisadas por temperatura e o fator de resfriamento, foram regulados através de simulações aqui expostas para se estudar a sensibilidade que os mesmos acarretariam nas respostas dos ganhos.

Quanto maiores os valores para N e α , maior pode ser a qualidade das soluções, porém deve-se ponderar que a medida que esses parâmetros aumentam, também sobem a quantidade de iterações e isso pode inviabilizar o processo como um todo por uma questão temporal.

Dentro as condições caracterizadas como boas, os parâmetros foram ajustados para $N = 4$ e $\alpha = 0,95$ atingindo valores para os ganhos, integral e proporcional respectivamente, ótimos globais com erros variando de 0,2% até 2,15% da solução ótima conhecida. Erros estes, muito satisfatórios, visto que o *Simulated Annealing* realiza suas buscas de soluções de uma forma randômica, e consequentemente sempre existirá um erro inerente.

Considerando que sistemas físicos reais possuem limitações, um segundo teste fora aplicado acrescentado um saturador, fazendo com que o sistema se tornasse não-linear, ou seja, a

utilização do *Simulated Annealing* se mostra muito mais justificável.

Considerando os parâmetros para N e α como já definidos, encontrou-se os ganhos para o sistema e a fim de verificar a qualidade da resposta, fez-se um algoritmo auxiliar para uma análise arbitrária da vizinhança das soluções encontradas pelo *Simulated Annealing*, de modo a verificar a qualidade das soluções. Dessa forma obteve-se 3 soluções com melhores resultados, sendo-a de mínimo global 4,4% melhor que a encontrada pelo SA.

Estes resultados, embora ainda não conclusivos, produzem uma projeção muito otimista em relação ao potencial do método proposto, já que estes foram os primeiros testes realizados e ainda sem nenhum estudo de controle de parâmetros, estudos estes, que podem produzir uma melhora ainda maior.

Finalmente, os resultados alcançados pelo método *Simulated Annealing* mostram a viabilidade da sua utilização como um meio de se obter ótimas soluções em problemas de otimização, em especial o problema aqui tratado. Deve-se ficar claro que o método dificilmente irá não se propõe em encontrar soluções exatas ou perfeitas, mas ele oferece mecanismos de encontrar-se soluções satisfatórias, próximas à ótima em um tempo viável.

Em pesquisas futuras, pode-se focar na redução do tempo que o algoritmo leva para encontrar soluções, investigar novas estruturas de vizinhanças, realizar-se uma definição mais fina para os parâmetros utilizados e também analisar a eficiência do *Simulated Annealing* quando comparado a outros métodos de otimização estocásticos, como o caso do Algoritmo Genético.

VIII. AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de dedicar este trabalho em especial à minha mãe, Ana Cristina Fernandes dos Santos, por ser a mulher da minha vida e sempre ter me incentivado nos estudos, além de nunca ter medido esforços para me ajudar a crescer tanto como homem quanto como estudante. Obrigado por ter me dado todo o suporte, carinho e atenção ao longo desta jornada.

Agradeço à minha família, em especial minha irmã Giulia, meu irmão Henrique e meu pai Valdir Junior, por toda a compreensão nas horas difíceis, sendo sempre meu porto seguro.

Agradeço à todos os meus amigos, que com toda alegria e paciência me acalentaram nos momentos mais difíceis, trazendo felicidade e sempre muito carinho. Suas vitórias sempre serão as minhas também. Muita gratidão em especial à Ana Flávia, Josephy, Maria Eduarda, Mauro Roberto, Paulo Henrique, Valentina e Victor.

Agradeço à minha namorada, Sâmia Gabriella, enorme fonte de alegria e meu ponto de equilíbrio. Obrigado por fazer parte desse momento, sempre me apoiando, estando junta e me tornando cada vez mais uma pessoa melhor.

Agradeço ao Prof. Dr. Wander Gonçalves por todo o companheirismo ao longo dos últimos meses, sempre se mostrando muito prestativo, obrigado por toda a paciência, compreensão e por todos os ensinamentos tanto acadêmicos quanto de vida. Gostaria que este fosse apenas o primeiro trabalho de vários.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Goiás, em especial aos professores da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, que foram fundamentais ao longo de toda a minha trajetória na graduação.

IX. REFERÊNCIAS

- [1] N. MOHAN, “Introdução aos sistemas de acionamentos,” *Máquinas Elétricas e Acionamentos*, 1. ed.- Rio de Janeiro: LTC 2015, p. 1-9.
- [2] P. Thogersen Mohan and F. Blaabjerg, “Adjustable-Speed Drives in the Next Decade: The Next Steps in Industry and Academia,” Proceedings of the PCIM Conference, Nuremberg, Germany, 2000
- [3] N. MOHAN, “Entendimentos dos Requisitos de Sistemas Mecânicos para Acionamentos Elétricos,” *Máquinas Elétricas e Acionamentos*, 1. ed.- Rio de Janeiro: LTC 2015, pp 12-25.
- [4] GONÇALVES, “Speed Control of Electric Drives in the Presence of Load Disturbances”, Newcastle, Março, 1999.
- [5] CHAPMAN, “Fundamentos de Máquinas CC”, *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, 5 ed.- Porto Alegre: AMGH 2013, p. 404-464.
- [6] EMILIANO, “Diagrama de Blocos”. Disponível em: <<https://blog.metzter.com/referencia-bibliografica-normas-abnt/#LIVROS-Apenas-1-autor>> Acesso em: 28 de Nov. 2019.
- [7] NISE, “Estabilidade”, *Engenharia de Sistemas de Controle*, 6 ed.- Rio de Janeiro: LTC 2012, p. 243-270.
- [8] JOHNSON, “Unmanned Free-Swimming Submersible” *System Description*. Washington, D.C, 1980.
- [9] HAROLDO, “Algoritmo *Simulated Annealing*: Uma Nova Abordagem”, Florianópolis, Maio de 2001.
- [10] GU, J. AND HUANG, X., *Efficient local search with search space smoothing: a case study of the traveling salesman problem (TSP)*, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, vol. 24, 1994, p. 728-735.
- [11] TANOMARU, J., *Motivação, Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos*, Congresso Brasileiro de Redes Neurais, Curitiba-PR, 1995.
- [12] REEVES, C. R., *Modern Heuristic techniques for combinatorial problems*, Advanced topics in computer science, McGraw Hill, 1995.
- [13] KIRKPATRICK, S., GELATT, Jr. C.D. AND VECCHI, M.P., *Optimization by Simulated annealing*, Science, n. 220, 1983, p. 671-680.

[14] CERNY, V., *Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm*, Journal of Optimisation Theory and Application, n. 45, 1985, p. 41-51.

[15] METROPOLIS, W., ROSENBLUTH, A., ROSENBLUTH M., TELLER, A. AND TELLER, E., *Equation of State Calculations by Fast Computing Machines*, Journal of Chemical Physics, vol. 21, 1953, p. 1087-1092.

[16] ZAKARIA, K., ACARNLEY, P., ZAHAWI, B., *Condition Monitoring of an Induction Machine using a Stochastic Search Technique*, Stonehaven, UK, 2006.

[17] YAO, X., *A new simulated annealing algorithm*, International Journal of Computer Mathematics, 56, p. 161-168, (1995).